



Diogo Alexandre Ruivo Inácio

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de
Computadores

**Dispositivo de interligação multi-rádio de
longo alcance para redes de sensores com
alimentação solar**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: João Pedro Abreu de Oliveira, Professor Doutor,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Luís Augusto Bica Gomes de Oliveira,
Professor Doutor, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Rodolfo Alexandre Duarte Oliveira

Arguente: Prof. Doutor Rui Manuel Leitão Santos Tavares

Vogais: Prof. Doutor João Pedro Abreu de Oliveira

Prof. Doutor Luís Augusto Bica Gomes de Oliveira



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Setembro 2013

Dispositivo de interligação multi-rádio de longo alcance para redes de sensores com alimentação solar

Copyright © Diogo Alexandre Ruivo Inácio, FCT/UNL, UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Agradeço a todas as pessoas que contribuírem diretamente ou indiretamente na realização deste trabalho, nomeadamente aos docentes e não docentes do DEE da FCT da UNL e particularmente aos professores da área de electrónica e de energia. Especialmente ao meu orientador Professor João Pedro Oliveira, pela sua inteira disponibilidade, paciência e constantes ensinamentos concedidos ao longo da realização da dissertação.

Agradeço/dedico à minha Querida Mãe por me inculir desde muito cedo o gosto pelo estudo e ter proporcionado os alicerces que me ajudaram a desenvolver a pessoa que sou. À minha Família nomeadamente aos meus Avós, Madrinha, Tia, Pai e Primos (David, Vanessa e Tiago), por estarem presentes nos momentos em que mais precisei, continuando com o legado deixado. Contribuindo para a minha formação como pessoa.

Aos meus amigos de infância pelas constantes peripécias, conversas e desabafos até à presente data. Salientando os seguintes amigos: Márcio, David, Luís, André, Jacks, Tiago, Murtas, Vanessa e Cíntia.

Aos meus colegas da universidade, de salientar aos camaradas dos longos e animados almoços, decorridos principalmente no último ano lectivo. Tendo o prazer de os conhecer um bocado melhor. Nomeadamente aos Fábios, Coelho, Nuno, Zé e não menos importantes à Andreia, Luísa e Raquel. Considerando-os não apenas colegas, mas sim amigos para a vida. De realçar o Fábio Pereira e o David Rodrigues.

Por último, à empresa Texas Instruments pelas amostras gentilmente fornecidas.

Resumo

A emergência das redes de sensores e actuadores sem fios e a sua integração numa estrutura mais global descrita pela “Internet das Coisas” (IoT), tem permitido a expansão dos sistemas inteligentes a novos domínios de actividade humana. Um desses domínios é a Agricultura de Precisão (AP) cujo o potencial ao nível da sua sustentabilidade só é efectiva quando suportada numa gestão optimizada dos recursos existentes.

Uma rede de sensores e actuadores de nova geração necessita de equipamentos versáteis, reconfiguráveis e com níveis de autonomia elevados. Sendo uma das peças âncora de uma rede deste tipo, o nó sensor e actuator remoto é constituído essencialmente por quatro blocos, nomeadamente a unidade sensorial/actuação, a unidade de controlo, a unidade de comunicação rádio e a unidade de fornecimento de energia. Do ponto de vista da comunicação rádio, esta deve ser estabelecida quer a curta quer a longa distância de modo a aumentar a área de cobertura. Por outro lado, a autonomia energética deve ser igualmente reforçada.

Neste trabalho apresenta-se o projecto, implementação e teste de um sistema completo para uma rede de sensores e actuadores capaz de operar em diversas bandas de rádio, permitindo-lhe elevado grau de adaptação. Neste contexto, a implementação de um equipamento energeticamente eficiente e com múltiplas formas de comunicação rádio permitem-lhe interagir com outros equipamentos e utilizar infra-estruturas já existentes, podendo ser um encaminhador para a Internet.

Palavras-chave: rede de sensores sem fios, nó sensor, longa distância, alimentação solar.

Abstract

The emergence of wireless sensors and actuators networks and their integration in a more global structure, described by the "Internet of Things" (IoT), has allowed the expansion of smart systems into new areas of human activity. One such area is the Precision Agriculture (PA) whose potential, in terms of its sustainability, is only effective when supported on smart management control systems.

The new generation of the wireless sensors and actuators network require new versatile, reconfigurable and low-power equipment. With an important role, the remote sensor and actuator node is essentially constituted by four blocks, namely the sensor/ actuator unit, the control unit, the radio communication unit and the power supply unit. From the point of view of the radio communication, it must be established either at short or long distance to increase the network coverage area. Moreover, energy autonomy should also be strengthened.

This work presents the design, implementation and testing of a complete system for a wireless sensors and actuators network that can operate in diverse radio bands, allowing a high degree of adaptation and reconfigurability. In addition to the node being energy efficient, the various forms of communication allows it to interact with other equipment and utilize existing infrastructure, allowing to functioning as a gateway to the Internet.

Keywords: wireless sensor networks, sensor node, long range, solar power.

Índice

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introdução | 1 |
| 1.1. | Enquadramento e Motivação | 1 |
| 1.2. | Objectivos | 2 |
| 1.3. | Estrutura da Dissertação | 3 |
| 2. | Rede de Sensores e Actuadores Sem Fios em Ambiente Rural | 5 |
| 2.1. | Agricultura de Precisão | 5 |
| 2.2. | Caracterização de uma Rede de Sensores e Actuadores Sem Fios | 9 |
| 2.2.1. | Topologias de rede WSN | 9 |
| 2.2.2. | Aplicações | 11 |
| 2.2.3. | Padrões de Interação | 13 |
| 2.3. | Estrutura do Nó Sensor e Actuator | 14 |
| 2.3.1. | Unidade Sensorial e de Actuação | 14 |
| 2.3.2. | Unidade de Processamento | 15 |
| 2.3.3. | Unidade de Comunicação Rádio | 15 |
| 2.3.4. | Unidade de Fornecimento de Energia | 16 |
| 2.4. | Aspectos de implementação de uma WSN e Requisitos | 17 |
| 2.4.1. | Considerações Preliminares | 17 |
| 2.4.2. | Fases de Implementação de uma WSN | 19 |
| 2.5. | Tópicos Avançados | 20 |
| 2.5.1. | Técnicas de Optimização | 20 |
| 2.5.2. | Transceptor Rádio Cognitivo | 24 |
| 3. | Comunicação Digital Rádio | 25 |
| 3.1. | Caracterização de uma ligação Rádio | 25 |
| 3.2. | Módulo de Comunicação | 30 |
| 3.3. | Desenvolvimento do primeiro protótipo da Placa de Comunicação | 36 |
| 3.3.1. | Esquemático do Circuito | 36 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.3.2. | Implementação do Circuito | 40 |
| 3.3.3. | Ensaio Experimental do Protótipo..... | 43 |
| 4. | Gestão Energética | 45 |
| 4.1. | Fornecimento Energético | 45 |
| 4.1.1. | Armazenamento de Energia | 45 |
| 4.1.2. | Fonte de Energia..... | 46 |
| 4.1.3. | Conversor DC-DC | 48 |
| 4.2. | Técnicas Avançadas para Redução do Consumo Energético | 49 |
| 4.2.1. | Controlo da Potência de Transmissão | 49 |
| 4.2.2. | Controlo de Actividade..... | 49 |
| 4.3. | Caracterização do Consumo Energético do Primeiro Protótipo de Teste..... | 53 |
| 5. | Projecto do NSA e Teste do Sistema Final..... | 55 |
| 5.1. | Arquitectura do NSA e Blocos Constituintes | 55 |
| 5.1.1. | Microcontrolador – MCU | 55 |
| 5.1.2. | Unidade de Comunicação..... | 55 |
| 5.1.3. | Unidade Energética | 57 |
| 5.2. | Desenvolvimento e Implementação do Hardware | 59 |
| 5.2.1. | Esquemático Eléctrico | 59 |
| 5.2.2. | Implementação em Circuito Impresso | 62 |
| 5.2.3. | Teste Individual da Placa | 63 |
| 5.3. | Desenvolvimento do Software de Controlo | 66 |
| 5.3.1. | Controlo da Unidade de Processamento..... | 68 |
| 5.3.2. | Controlo da Unidade de Comunicação..... | 68 |
| 5.4. | Ensaio Experimental da Aplicação 1..... | 70 |
| 5.4.1. | Frequência Rádio de 434 MHz..... | 71 |
| 5.4.2. | Frequência Rádio de 868 MHz..... | 72 |
| 5.4.3. | Frequência Rádio de 2,4 GHz..... | 72 |
| 5.4.4. | Custo das Placas | 76 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.5. | Ensaio Experimental da Aplicação 2..... | 77 |
| 5.6. | Integração da WSAN num Contexto Agrícola..... | 80 |
| 6. | Conclusões e Trabalhos Futuros..... | 83 |
| A. | ANEXO - Esquemático dos Circuitos..... | 87 |
| B. | ANEXO - Software..... | 89 |
| B.1 | para a Placa “ <i>Master</i> ” | 89 |
| B.2 | para a Placa “ <i>Multi-Hop</i> ” | 90 |
| B.3 | para a Placa “ <i>ASK 868 MHz</i> ” | 92 |
| B.4 | para a Placa “ <i>ASK 434 MHz</i> ” | 92 |
| B.5 | para a Placa “ <i>Wifly</i> ” | 93 |
| B.6 | Funções/Procedimentos em Comum..... | 96 |
| | Bibliografia | 99 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1- Perspectiva da aplicação de WSN num contexto agrícola..... | 2 |
| Figura 2.1- Esquema geral da AP (a partir de [1]). | 6 |
| Figura 2.2- a) Sistema LEPA (a partir de [3]); b) Sistema SAM (a partir de [4])...... | 7 |
| Figura 2.3- Topologia forma estrela. | 9 |
| Figura 2.4- Topologia forma de malha. | 10 |
| Figura 2.5- Topologia forma Híbrida. | 11 |
| Figura 2.6- Arquitectura do NSA. | 14 |
| Figura 2.7- Comunicação <i>Multi-hop</i> | 22 |
| Figura 2.8- Comunicação utilizando <i>Multi-hop</i> e conceito <i>Gateway</i> | 23 |
| Figura 3.1- Exemplo de uma análise da comunicação sem fios. | 25 |
| Figura 3.2- Diagrama de blocos do transreceptor (a partir de [17]). | 31 |
| Figura 3.3- Topologia <i>Integer-N</i> (a partir de [17]). | 31 |
| Figura 3.4- Filtro 2ª ordem (a partir de [17]). | 32 |
| Figura 3.5- Circuito VCO (a partir de [17]). | 33 |
| Figura 3.6- Circuito <i>crystal pulling</i> (a partir de [17]). | 35 |
| Figura 3.7- Modulação FSK..... | 36 |
| Figura 3.8- Modulação ASK. | 36 |
| Figura 3.9- Solução para integrar as duas modulações (programa Eagle). | 36 |
| Figura 3.10- Esquema para frequências superiores a 300 MHz..... | 37 |
| Figura 3.11- Esquema para frequências inferiores a 300 MHz. | 37 |
| Figura 3.12- Solução para integrar as duas gamas de frequências (Eagle). | 37 |
| Figura 3.13- Filtro de Segunda Ordem (a partir de [24]). | 37 |
| Figura 3.14- Circuito para <i>Peak Detector</i> (a partir de [17]). | 39 |
| Figura 3.15- Desmodulação FSK (a partir de [17]). | 40 |
| Figura 3.16- Esquemático completo da placa (Eagle). | 40 |
| Figura 3.17- <i>Layout</i> completo da placa (Eagle). | 42 |
| Figura 3.18- Pré-visualização da placa utilizando o programa Google SketchUp 8. | 42 |
| Figura 3.19- Modo transmissão 40 MHz. | 43 |
| Figura 3.20- Modo transmissão 434 MHz. | 43 |
| Figura 4.1- Descarga típica de uma bateria (a partir de [34]). | 46 |
| Figura 4.2- Modelo eléctrico de uma célula fotovoltaica. | 47 |
| Figura 4.3- Curva característica de uma célula (a partir de [36] e alterado). | 48 |
| Figura 4.4- Modelo <i>duty cycle</i> | 50 |

| | |
|---|--------|
| Figura 4.5- Máxima performance do processador (a partir de [8] e alterado)..... | 51 |
| Figura 4.6- Optimização dos parâmetros (a partir de [8] e alterado)..... | 52 |
| Figura 5.1- Arquitectura proposta..... | 55 |
| Figura 5.2- Controlador Painel-Bateria. | 59 |
| Figura 5.3- Seleccionar a forma de alimentação 5 V..... | 60 |
| Figura 5.4- <i>Breakout</i> Infravermelho..... | 60 |
| Figura 5.5- Esquemático completo da Placa – Parte 1..... | 61 |
| Figura 5.6- Esquemático completo da Placa – Parte 2..... | 61 |
| Figura 5.7- a) <i>Layout</i> da Placa; b) protótipo completo. | 62 |
| Figura 5.8- Teste da componente energética. | 63 |
| Figura 5.9- Teste da componente energética com influência do diódo Zener. | 63 |
| Figura 5.10- Modo transmissão. | 64 |
| Figura 5.11- Sinal à entrada do IFA. | 64 |
| Figura 5.12- Evolução do RSSI. | 65 |
| Figura 5.13- Método para programar um registo (a partir de [17]). | 69 |
| Figura 5.14- Exemplo de uma aplicação..... | 70 |
| Figura 5.15- Imagem da aplicação em estudo (Xively)..... | 73 |
| Figura 5.16- Circuito típico (a partir de [50])..... | 74 |
| Figura 5.17- Evolução do consumo energético. | 75 |
| Figura 5.18- Consumo energético – <i>sleep</i> | 75 |
| Figura 5.19- Consumo energético – transmissão com o PA ligado..... | 75 |
| Figura 5.20- Quadro da implementação realizada..... | 77 |
| Figura 5.21- Diagrama das diversas frequências de comunicação. | 78 |
| Figura 5.22- Consumo energético mínimo “ASK 434 MHz” – <i>sleep</i> | 78 |
| Figura 5.23- Consumo energético máximo “ASK 434 MHz”. | 78 |
| Figura 5.24- Diagrama página da Internet. | 79 |
| Figura 5.25- Diagrama da categoria actuação..... | 79 |
| Figura 5.26- Topologia da aplicação 3..... | 81 |
| Figura A.1- Esquemático Amplo da Placa de Teste. | 87 |
| Figura A.2- Esquemático Amplo do Protótipo Final. | 88 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1- Frequências das Bandas ISM. | 17 |
| Tabela 3.1- <i>Free-Space Path Loss</i> | 27 |
| Tabela 3.2- Potência de saída do transmissor..... | 28 |
| Tabela 4.1- Características Baterias Secundárias (a partir de [31]). | 45 |
| Tabela 4.2- Comparação Geradores de Energia (a partir de [10]). | 47 |
| Tabela 4.3- Modos de Configuração. | 51 |
| Tabela 4.4- Características energéticas..... | 53 |
| Tabela 4.5- Consumo energético de diferentes versões do Arduino..... | 54 |
| Tabela 5.1- Características principais RFM22B. | 56 |
| Tabela 5.2- Características principais RN-XV..... | 56 |
| Tabela 5.3- Características principais do módulo Infravermelho. | 57 |
| Tabela 5.4- Ligação da placa de teste. | 66 |
| Tabela 5.5- Ligações da placa principal. | 67 |
| Tabela 5.6- Preço da placa de teste. | 76 |
| Tabela 5.7- Preço da placa “Master”. | 76 |

Lista de Acrónimos

ADC – *Analog-to-Digital Converter*

ANACOM – *Autoridade Nacional de Comunicações*

AO – *Amplificador Operacional*

AP – *Agricultura de Precisão*

ARQ – *Automatic Repeat Request*

ASK – *Amplitude-Shift Keying*

BER – *Bit Error Rate*

CMOS – *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*

CP – *Charge Pump*

CRC – *Cyclic Redundancy Check*

DARPA – *Defense Advanced Research Projects Agency*

DFS – *Dynamic Frequency Scaling*

DPM – *Dynamic Power Management*

DVS – *Dynamic Voltage Scaling*

EIRP – *Effective Isotropic Radiated Power*

EMI – *ElectroMagnetic Interference*

FCC – *Federal Communications Commission*

FM – *Fade Margin*

FSK – *Frequency-Shift Keying*

FSPL – *Free-space path loss*

GPS – *Global Positioning System*

HTTP – *HyperText Transfer Protocol*

IDE – *Integrated Development Environment*

IFA – *Intermediate Frequency Amplifier*

IoT – *Internet das Coisas*

ISM – *Industrial, Scientific and Medical*

ISP – *In-System Programmer*

LED – *Light Emitting Diode*

LEPA – *Low Energy Precision Application*

MCU – *Microcontroladores*

MF – *Margem de Fase*

NF – *Noise Figure*

Ni-Cd – *Níquel Cádmio*

Ni-MH – Níquel Metal Hidreto
NRZ – *Non-Return-to-Zero*
NSA – Nó Sensor/Atuador
OOK – *On-Off Keying*
PA – *Power Amplifier*
PCB – *Printed Circuit Board*
PFD – *Phase-Frequency Detector*
PID – *Product ID*
PL – *Path Loss*
PLL – *Phase-Locked Loop*
PPM – Ponto de Potência Máxima
PUM – *Programmable User Mode*
QoS – Qualidade de Serviço
RF – Radio Frequência
RSL – *Receive Signal Level*
RSSI – *Received Signal Strength Indicator*
SAM – *Stevens Agricultural Monitoring*
SCI – *Serial Control Interface*
SMA – *SubMiniature version A*
SNR – *Signal-to-Noise Ratio*
SPI – *Serial Peripheral Interface*
SUM – *Stand-alone User Mode*
TFT – *Thin-Film Transistor*
TTL – *Transistor-Transistor Logic*
UDP – *User Datagram Protocol*
USB – *Universal Serial Bus*
USB-IF – *USB Implementers Forum*
UWSN – *Wireless Underwater Sensor Network*
VCO – *Voltage-Controlled Oscillator*
VID – *Vendor ID*
WIFI – *Wireless Fidelity*
WSAN – *Wireless Sensor and Actuator Network*
WUSN – *Wireless Underground Sensor Network*
xG – *NeXt Generation*

1. Introdução

1.1. Enquadramento e Motivação

A emergência das redes de sensores e actuadores sem fios e a sua integração numa estrutura mais global descrita pela “Internet das Coisas” (IoT), têm permitido a sua expansão em novos domínios de aplicabilidade. Um desses domínios é a Agricultura de Precisão (AP) cujo o potencial ao nível da sua sustentabilidade só é efectiva quando suportada numa gestão optimizada dos recursos existentes, designadamente, a água.

A agregação de sensores e actuadores interligados entre si através de uma rede sem fios (do inglês, *Wireless Sensor and Actuator Network* – WSAN) é um conceito multidisciplinar e com desenvolvimento crescente desde o início da década de 80. Todavia, o forte desenvolvimento da WSAN verificado nos últimos anos deve-se à globalização da Internet por um lado e, por outro, à forte redução de custos associados aos componentes electrónicos e aos sensores disponibilizados pela tecnologia de circuito integrado com recurso ao *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (CMOS).

Entre outros factores, o sucesso de uma WSAN passa pela facilidade de instalação e por atingir índices reduzidos de manutenção, o que sugere que disponha de fontes próprias de captação de energia por forma a aumentar o nível de autonomia. No caso da aplicação de uma WSAN em contexto rural e agrícola, a utilização de energia solar emerge com uma opção natural dada a sua disposição no terreno.

Complementarmente, para além de uma gestão de energia eficiente, a contribuição para uma agricultura mais sustentável é tanto mais efectiva quanto maior for o grau de interligação entre os vários componentes do sistema. Isto tem implicações ao nível da capacidade de comunicação digital que deverá ser bidirecional de modo a permitir o envio de dados recolhidos pelos sensores e a recepção de comandos processados centralmente. Naturalmente que a tecnologia sem fios com recurso ao rádio emerge como opção preferencial. Todavia, a comunicação rádio em ambiente agrícola enfrenta dificuldades acrescidas devido à forte variabilidade do nível e qualidade do sinal propagado. Uma das soluções propostas neste trabalho passa pela implementação de equipamentos terminais (Nó Sensor e Actuador – NSA) que disponham de transreceptor rádio multi-banda que possa facilmente se auto-reconfigurar de modo a optar pelo melhor canal de comunicação.

Em suma, podendo uma WSAN ser utilizada em diversas aplicações (ambientais, militares, industriais, médicas), inseridas ou não em ambientes hostis e com restrições energéticas, há que dotar os equipamentos NSA de grande flexibilidade de configuração através da incorporação de mecanismos eficientes que optimizem a comunicação entre dispositivos.

1.2. Objectivos

A aplicação alvo associada ao sistema proposto é a monitorização, processamento e actuação em tempo real dos diversos factores existentes numa área de agricultura sustentada (nomeadamente a AP em estufa). Para permitir uma gestão eficiente e ecologicamente sustentável, e que proporcione as melhores condições de desenvolvimento da plantação, perspectiva-se uma abordagem sistémica, representada na Figura 1.1.

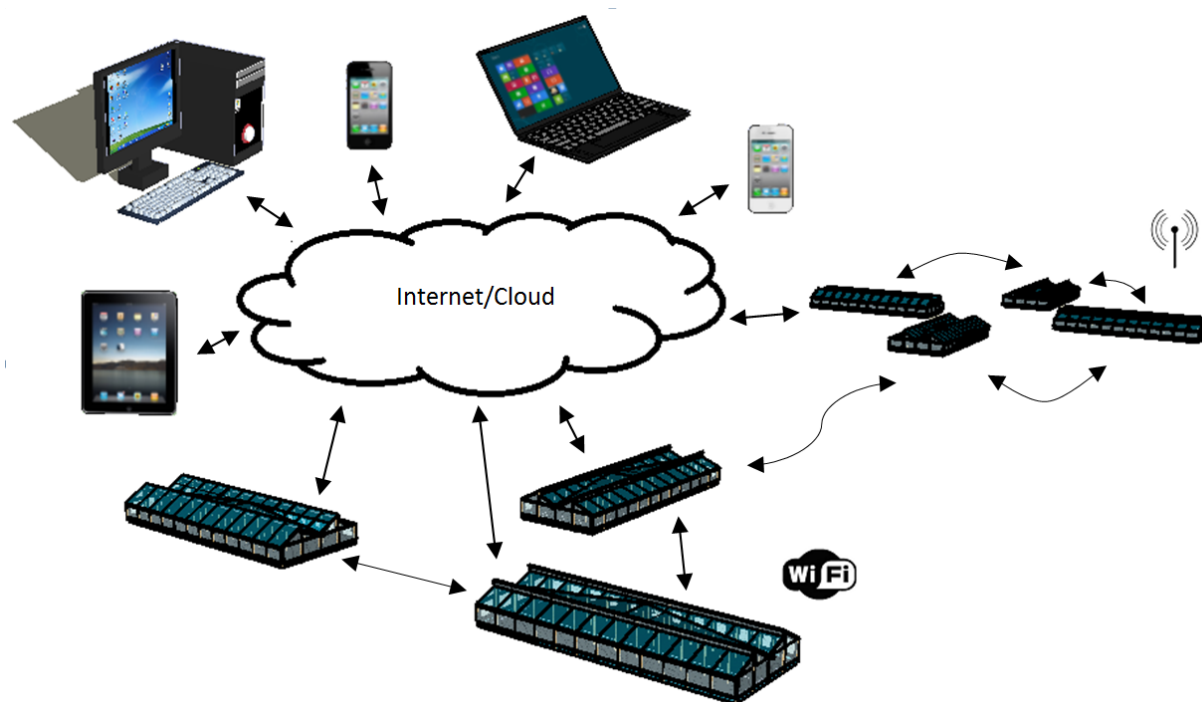


Figura 1.1- Perspectiva da aplicação de WSAN num contexto agrícola.

O exemplo representado na figura anterior remete para a necessidade de interligação flexível e fiável entre todos os elementos da rede. De salientar que, para além da comunicação local entre os dispositivos existentes na rede sem fios, estes podem interagir numa escala mais global, via Internet. Este exemplo será detalhado no quinto capítulo.

Em sumário, os principais objectivos do trabalho descrito nesta Dissertação são:

- desenvolvimento de um equipamento autónomo com alimentação solar para uma WSAN, e que deverá ter capacidade de comunicação rádio multi-banda;
- caracterização experimental da unidade de comunicação;
- implementação de uma rede de sensores e actuadores sem fios, utilizando uma abordagem que permita ao utilizador efetuar monitoração remota e respectiva actuação sobre o meio.

1.3. Estrutura da Dissertação

Partindo-se de uma aproximação descritiva do tipo *top-down*, estruturou-se a presente dissertação em seis capítulos. O presente capítulo introdutório enquadra o tema e estabelece os macro objectivos do trabalho proposto, dando-se especial ênfase à aplicação final.

O segundo capítulo apresenta e descreve o que são redes de sensores e actuadores sem fios (WSAN) contextualizando-se, previamente, a sua inserção na AP. Estas estruturas avançadas são descritas, nomeadamente ao nível da sua arquitetura e elementos que as constituem.

Os dois capítulos seguintes detalham dois dos principais desafios tecnológicos associados a estas redes: o estabelecimento de comunicações fiáveis sem recurso a cabos e a gestão energética eficiente dos vários componentes do sistema. O capítulo três abrange a comunicação sem fios, dando-se especial enfoque à comunicação digital em canais de rádio. Este capítulo inclui a descrição e a apresentação de resultados experimentais obtidos com um módulo de comunicações especialmente desenvolvido para o efeito.

Dedica-se todo capítulo quatro ao tema da gestão energética do sistema e respectivos componentes. Descrevem-se, assim, as diversas estratégias de alimentação do Nó Sensor e Actuador, detalhando-se as técnicas que permitem otimizar o seu consumo.

Partindo das considerações descritas nos capítulos anteriores, descreve-se pormenorizadamente no capítulo cinco, o projecto e respectivo teste experimental de uma rede WSAN ao nível dos seus equipamentos remotos que operam num ambiente multi-rádio. O capítulo termina com a apresentação de um sistema completo com ligação a uma *Cloud* que permite a visualização em tempo real de painéis de controlo com recurso a tecnologias *www*.

Por fim, o capítulo seis apresenta as principais conclusões assim como aponta sugestões para próximas evoluções.

2. Rede de Sensores e Actuadores Sem Fios em Ambiente Rural

2.1. Agricultura de Precisão

O enquadramento económico da actividade agrícola ambientalmente sustentável é viável desde que se altere o paradigma operacional da mesma. O recurso a equipamento electrónico e electromecânico controlado por software sofisticado, permite transformar a atividade agrícola tradicional numa AP. A AP é assim uma metodologia de processo que consiste na introdução e utilização de tecnologia avançada, com o objectivo de analisar, monitorizar todas as variáveis com influência no sistema de modo a proporcionar as melhores condições para uma determinada produção agrícola. Diminuem-se deste modo os custos de produção, mantendo um agricultura eficiente quer em quantidade quer em qualidade (com menor impacte ambiental).

Para alcançar os objectivos pretendidos o sistema de controlo da AP avalia as características geográficas de uma determinada área (parcela de terreno), obtendo por exemplo as características associadas ao tipo do solo (capacidade de armazenamento de água, permeabilidade, pH e teor em nutrientes) e as que estão associadas à topologia do terreno. Esta avaliação permite auxiliar o agricultor na tomada de decisões (por exemplo, na escolha da cultura) e facilitar a escolha da cultura. A optimização é atingida aplicando de forma diferenciada os factores de produção (fertilizantes, fitofármacos, sementes ou plantas e água de rega), permitindo especificar para cada parcela de terreno as concentrações ideais. Para além da redução de custos, é possível, com esta metodologia, reduzir a grau contaminação das águas residuais e subterrâneas.

A AP utiliza diversos sistemas de suporte, nomeadamente, o sistema de informação geográfica, permitindo realizar um mapeamento dos dados (e.g. características do solo) em função de atributos espaciais. Estes mapas são complementados com informação recolhida dos sensores e também das análises sobre o solo. Por via de sensores pode-se também fornecer parâmetros de entrada a serem incluídos nos modelos agronômicos de crescimento das culturas (agrícolas) e desse modo estimar a produtividade antes da colheita, bem como quantificar a cobertura de vegetação do solo. Os casos mencionados anteriormente são factíveis através da utilização de um sensor de radiação electromagnética, sendo que este capta a energia emitida ou reflectida pela superfície terrestre, recorrendo à reflectância no verde e no vermelho (por exemplo) para proceder no auxílio dos casos anteriores [1]. A Reflectância é a relação do fluxo de radiação que incide com o fluxo de radiação que é reflectido numa superfície.

Como referido anteriormente, a AP utiliza aplicações diferenciadas dos factores de produção, no qual é fortemente submisso à variabilidade espacial. Recorre a duas abordagens distintas: por mapas

(informação recolhida pelo sistema de informação geográfica, dependência posicional) e por sensores (informação em tempo real). Para além, destas abordagens de monitoração, as aplicações diferenciadas têm de possuir outras formas tecnológicas, nomeadamente controladores e mecanismos de distribuição de modo a proceder de forma automática a uma rigorosa aplicação (espacial) dos factores de produção. Os controladores são responsáveis pelo processamento dos dados (informação) recolhidos pelas abordagens de monitoração. Depois de processado os dados, o controlador informa os mecanismos de distribuição, actuando ou regulando sobre este. Podendo os mecanismos serem válvulas ou bombas, cujo controlo pode ser, por exemplo, eléctrico, mecânico, pneumático ou hidráulico [1].

Em suma a AP pode ser representada pela Figura 2.1.

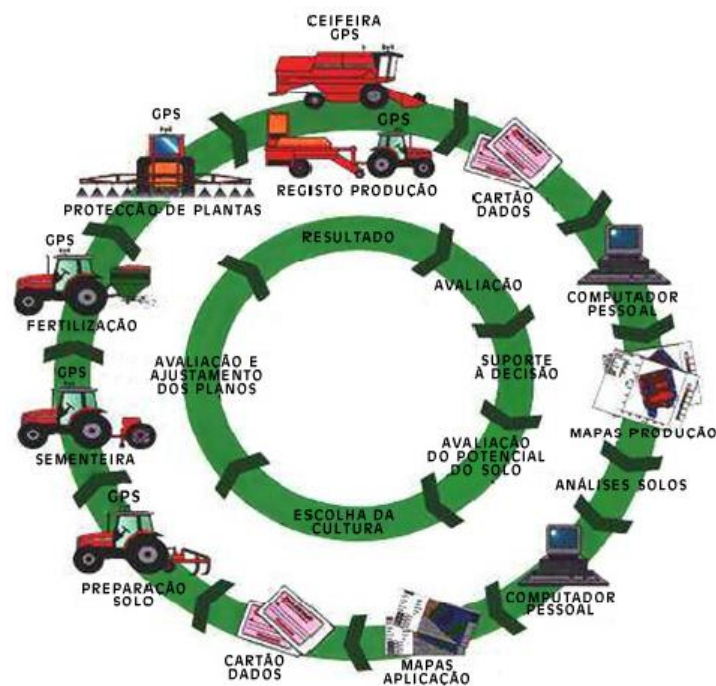


Figura 2.1- Esquema geral da AP (a partir de [1]).

Como se pode observar pela Figura 2.1, está representado o esquema geral da AP, as fases e as tecnologias/recursos utilizados ao longo de um ciclo de cultivo, desde o estudo/análise do solo até à colheita da cultura agrícola.

Em virtude dos factores de produção serem aplicados em operações diferenciadas e com auxílio de todo o sistema que envolve a AP, permite obter as seguintes sensibilidades práticas sobre o tema (por exemplo) [1]:

- na aplicação de fitofármacos, permite aplicar diferentes concentrações de herbicida, consoante a informação de diferentes gamas de infestação;
- aplicar quantidade de sementes ou plantas em conformidade com as condições do solo, aumentar o volume de sementes ou plantas de modo a optimizar a cultura agrícola por

unidade de área (caso favorável), para o caso contrário (condições do solo não favorável), aumentar também a densidade de sementes ou plantas para contornar os problemas de germinação.

Em virtude da escassez e da imprescindível função que a água possui, a rega é um assunto de extrema importância. Existindo diversos métodos de rega, nomeadamente aspersão, gravidade e gota-a-gota. Um método regularmente utilizado é o método por aspersão de alta pressão (*center-pivot irrigation*), fortemente utilizado em Saskatchewan (Canadá). Alcançando perdas de água superiores a 30 %, durante o período de desenvolvimento da cultura agrícola, devido às condições de evapotranspiração (ventos fortes, temperatura excessiva e baixa humidade relativa do ar) [2].

Para se atingir uma utilização eficiente da água, evitando os enormes desperdícios de água na agricultura, há a necessidade de se controlar eficientemente todo o processo de rega. Sabe-se por outro lado que a rega localizada, próximo da raiz da planta, permite atingir tais objectivos. Mais ainda se for adicionado um conjunto de sensores localizados que permitam avaliar o estado e as características do solo e contribuir para a determinação da quantidade de água necessária, recorrendo-se por exemplo aos seguintes sistemas, Figura 2.2.

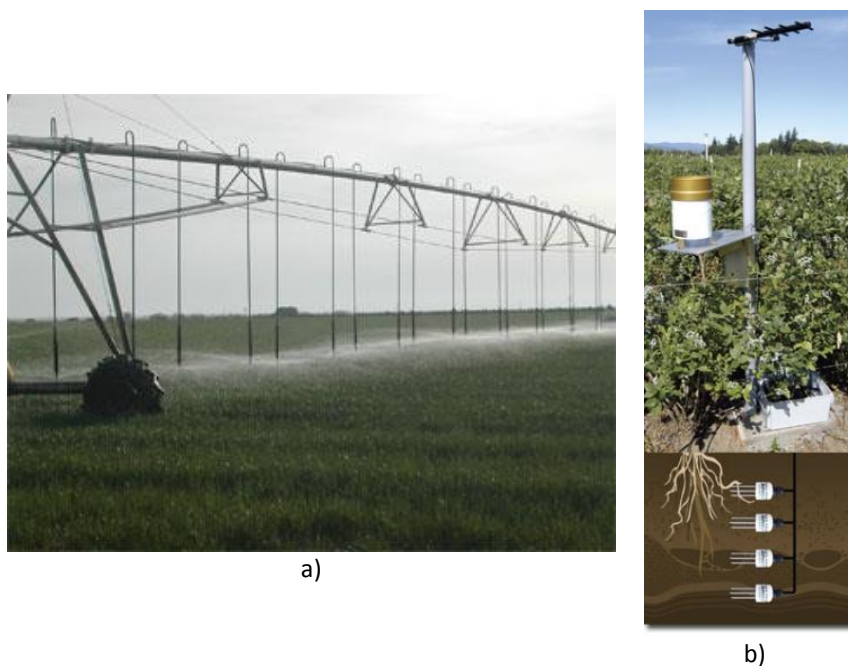


Figura 2.2- a) Sistema LEPA (a partir de [3]); b) Sistema SAM (a partir de [4]).

Um sistema elaborado para economizar água e energia é denominado por *Low Energy Precision Application* (LEPA), Figura 2.2-a). É um sistema de bombeamento de baixa pressão, irrigação próxima do solo, usado essencialmente para cultura em carreira e com uma eficiência de aplicação de rega tipicamente superior a 95 % [2].

O sistema representado na Figura 2.2-b) é o *Stevens Agricultural Monitoring* (SAM) [4], que realiza a monitoração meteorológica, bem como de algumas características do solo (e.g. humidade,

condutividade eléctrica e temperatura do solo). E desse modo permite auxiliar o Agricultor na tomada de decisões e na gestão eficiente dos recursos agrícolas.

Genericamente, devido à complexidade do ambiente agrícola muitas grandezas ambientais têm de ser tomadas em conta de modo a proporcionar as melhores condições no desenvolvimento da cultura. Para auxiliar nesta operação utiliza-se uma rede de sensores sem fios. As grandezas a medir são essencialmente a temperatura, humidade relativa no ar e no solo, iluminação (solar), pressão atmosférica e níveis de água, precipitação e nutrientes. Estas grandezas devem estar compreendidas numa gama de valores admissíveis. Caso contrário irá provocar efeitos não propícios para o bom desenvolvimento da cultura agrícola, podendo ocorrer a sua total ou parcial devastação.

2.2. Caracterização de uma Rede de Sensores e Actuadores Sem Fios

Uma rede sensores e actuadores sem fios (WSAN) consiste num conjunto de equipamentos remotos (Nó sensor e actuador), dispersos geograficamente, os quais dispõem de capacidade de interacção com o meio envolvente. Estes equipamentos não só monitorizam grandezas físicas e ambientais (por exemplo, temperatura, pressão e posição), como também dispõem de meios para actuar através de um conjunto diversificado de dispositivos apropriados. Em virtude, da sua capacidade de comunicação e processamento, podem tomar decisões no local ou transmitir dados e informações de controlo para o dispositivo terminal (Receptor) e esperar pela ordem de comando. A comunicação sem fios poderá garantida através de Rádio Frequência (RF), infravermelhos ou ondas acústicas e/ou ultrasons.

Um Nó Sensor e Actuador (NSA) é constituído com base em quatro módulos: a unidade sensorial e actuação, a unidade de processamento e memória, a unidade de comunicação que deverá ser preferencialmente bidireccional, e a unidade de alimentação e armazenamento de energia.

2.2.1. Topologias de rede WSAN

A arquitetura de uma rede de sensores e actuadores reflecte um conjunto de critérios e objectivos que dependem não só da aplicação alvo com também de aspectos de natureza económica. Todavia, para que mantenha uma operação optimizada esta deverá incorporar capacidades de auto-adaptação e de reconfigurabilidade, por forma a melhor responder à grande variabilidade das condições de operação ao longo do tempo. Estas adversidades estão naturalmente relacionadas com as variações na parametrização da aplicação e com os escassos recursos energéticos ao dispor do NSA. Descrevem-se de seguida um conjunto de topologias mais usuais.

Topologia em Estrela

Nesta topologia de rede, representada na Figura 2.3, todos os Nós partilham dados e sinalização com uma única plataforma Central, não ocorrendo comunicação directa entre Nós remotos. Esta estrutura também é conhecida por *single point-to-multipoint*, ou seja, único ponto para multipontos.

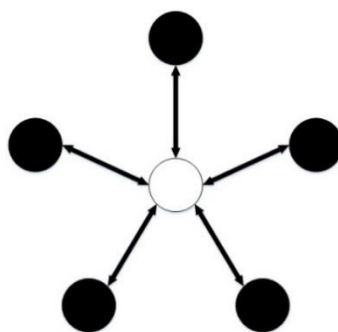


Figura 2.3- Topologia forma estrela.

As principais vantagens em utilizar-se este tipo de topologias na WSAN são:

- desenvolvimento e implementação simplificados ;
- para redes de curta distância, esta configuração permite otimizar o consumo energético de cada Nó remoto;
- baixa latência na transmissão digital, dado que apenas existe um salto entre o Nó remoto e o Nó central.

Do lado das desvantagens é possível identificar as seguintes:

- os Nós remotos têm todos de estar dentro do alcance do Nó central;
- é uma estrutura pouco resistente a falhas em especial quando estas ocorrem no Nó central, podendo originar a total inoperacionalidade da WSAN;
- degradação da qualidade associada à comunicação digital resultante do aumento do nível interferências provocadas pelo incremento do número de Nós (densidade).

Topologia em Malha

Contrariamente à configuração descrita no ponto anterior, esta topologia permite que, no limite, todos os Nós comuniquem entre si, conforme se representa na Figura 2.4.

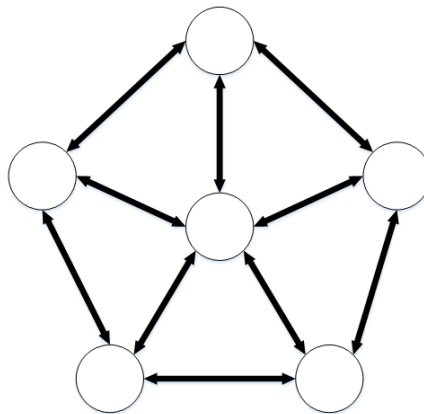


Figura 2.4- Topologia forma de malha.

Ao permitir que os Nós comuniquem com todos os Nós à sua volta, possibilita que uma mensagem possa ser retransmitida por vários Nós até chegar a um Nó terminal de destino, mesmo que o Nó onde se gerou a mensagem (Fonte) e o Nó destinatário (Receptor) estejam fora do alcance um do outro. Portanto, para que exista uma comunicação a longa distância utiliza-se Nós intermédios para que a mensagem seja retransmitida de um Nó para outro, até alcançar o Nó terminal. Este método designa-se por comunicação *multi-hop*, muito usado na WSAN (salientado mais à frente).

Esta topologia tem como principais vantagens:

- ser robusta a falhas, dado que a inoperacionalidade de um dos Nós não coloca em risco a operacionalidade da rede como um todo;

- tem forte capacidade de escalabilidade, dado que a operacional da rede não é significativamente afectada pela variação do número de Nós activos.

Por outro lado, a topologia de comunicação do tipo malha tem como principal desvantagem o facto de necessitarem de mais recursos computacionais distribuídos para que possam incorporar mecanismos de encaminhamento e de coordenação mais complexos.

Topologia Híbrida (Estrela - Malha)

Neste tipo de topologia, tira-se partido das principais características das topologias mencionadas anteriormente (Estrela e Malha). Pretende-se, com esta configuração, reforçar o nível de robustez e escalabilidade, minimizando o consumo energético e a complexidade dos vários NSA.

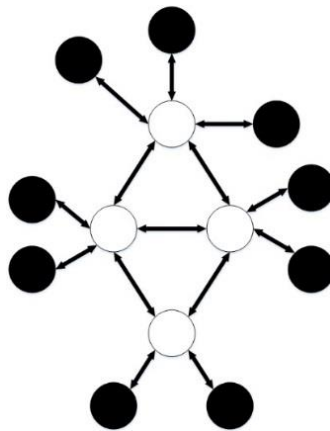


Figura 2.5- Topologia forma Híbrida.

Na topologia Híbrida, os Nós com menos recursos energéticos deixam de retransmitir mensagens mantendo apenas a comunicação com o Nó central, numa subestrutura em Estrela. Por outro lado, a rede também dispõe de Nós com capacidade de retransmissão *multi-hop*, o que permite alargar o raio de acção de uma rede deste tipo.

2.2.2. Aplicações

A versatilidade crescente dos NSA é consequência das capacidades de comunicação e aos inúmeros componentes sensoriais e actuadores incluídos (temperatura, pressão, humidade, câmara, radares, entre outros) o que tem originado a desenvolvimento de WSN em diversos cenários aplicativos:

- militares;
- ambientais;
- saúde;
- domésticas;
- industriais e comerciais.

A WSAN começou a ser desenvolvida para aplicações militares, sendo que o primeiro projecto foi elaborado na década de 50 pelos Estados Unidos com a intenção de detectar e rastrear os submarinos Soviéticos durante a Guerra Fria, tendo sido o sistema designado por *Sound Surveillance System* (SOSUS) e distribuído pelo oceano Atlântico e Pacífico [5]. Um outro projecto chave foi elaborado pela University of California Berkeley, tendo sido designada por *Smart Dust*. A primeira geração deste equipamento terminal (o dispositivo foi designado por *mote*) possuía um volume de cerca de 100 milímetro cúbicos, tendo falhado o objectivo inicial de se atingir uma volumetria do Nó próximo do milímetro cúbico. Teve, no entanto, o mérito de estabelecer os primeiros passos na direcção da integração de sistemas completos em circuito integrado. Foi igualmente avaliada a sua utilização em ambiente militar para vigilância no campo de batalha, monitorização de transporte e caça dos lançadores de mísseis (*scud-hunting*) [6][7].

A WSAN pode ser utilizada em ambientes hostis e de difícil acesso, nomeadamente na monitorização de poluição química, actividade vulcânicas e sísmicas. Poderá ser, igualmente, um importante auxiliar em situações de desastre, como por exemplo na detecção e mapeamento das frentes activas de um incêndio. Uma outra vertente é a monitorização de movimentação de animais ou monitorização das características e estado do solo, por exemplo, na AP. Tendo como exemplo o protótipo usado em *Okanagan Valley* (2004), para monitorização e caracterização da variação da temperatura em vinhas (sendo a temperatura um parâmetro preponderante para a qualidade e quantidade da produção vitícola), verifica-se que estas são ferramentas importantes na escolha da melhor casta para uma determinada região [8].

Relativamente à área da saúde, a WSAN poderá ser usada na monitorização remota dos dados fisiológicos promovendo por exemplo a tele-assistência remota.

Na área doméstica, a WSAN é um importante factor utilizado na optimização do conforto do edifício, diminuindo o excessivo consumo energético do sistema, por exemplo, do *Heating, Ventilation, and Air-Conditioning* (HVAC). Pode ser igualmente utilizada na monitorização e detecção de fugas em tubagem (água e gás) e monitorização das condições da habitação (temperatura e humidade).

Para finalizar, a última área de aplicação é a industrial/comercial, podendo a WSAN ser aplicada na manutenção preventiva em equipamentos industriais e em zonas de difícil acesso.

Para além da comunicação via rádio outros meios físicos devem ser considerados. Se o meio for a água a rede designa-se por *Wireless Underwater Sensor Network* (UWSN). Se o meio for o solo, a rede designa-se por *Wireless Underground Sensor Network* (WUSN) o caso da água e do solo.

A UWSN [6], como foi referida anteriormente, é utilizada para aplicações subaquáticas tais como a monitorização da poluição, recolha de dados oceanográficos e prevenção de desastres. Para que tal seja possível, é necessário recolher dados do meio em questão (através de sensores, sonares), e

retransmiti-los para uma estação em terra (*onshore station*). Portanto, os dispositivos têm de possuir capacidade de comunicação debaixo de água e serem auto-configuráveis. Dada a enorme atenuação sofrida pelas ondas electromagnéticas na água, outras soluções no domínio acústico têm vindo a ser desenvolvidas. A solução que actualmente é usada no meio de propagação debaixo de água é a comunicação acústica, implementada em 1945 (segunda Guerra Mundial) pelos Estados Unidos para interagir com os seus submarinos, alcançando vários quilómetros comunicação [9]. Para alcançar o objectivo de uma comunicação acústica fiável, sendo as principais áreas em estudo a comunicação e o processamento de dados, realizando técnicas de modulação e codificação mais eficientes. Relativamente à comunicação, este como é óbvio tem de garantir uma comunicação em rede, possuir mecanismo que tolerem os longos atrasos da propagação do sinal e poucos requisitos energéticos [9]. Os sinais transmitidos podem ser de carácter de controlo (estados de informação, comando *on/off*), telemetria (dados recolhidos por equipamentos acústicos, sonares, hidrofonos), fala (exemplo, comunicação de voz entre o mergulhador e a estação à superfície) e vídeo [9].

Para finalizar, a WUSN [6] consiste na comunicação sem fios debaixo da superfície da terra, podendo ter espaços abertos, como acontece com túneis subterrâneos e minas. Tendo como aplicação a monitorização das condições do subsolo (água e teor mineral), integridade das infra-estruturas (canalizações) e terremotos e deslizamentos terrestres. O principal desafio associado à WUSN é a forte atenuação existente no meio de propagação (solo). Portanto tem de possuir técnicas e modelos mais complexos do que a WSAN para otimizar a comunicação nesse ambiente. Bem com desafios associados à eficiência energética, topologia da rede, projecto da antena (tamanho, direcionalidade) e condições extremas (água, temperaturas extremas, animais e equipamentos de escavação) [6].

2.2.3. Padrões de Interação

Destacam-se 3 padrões de interação associados à operacionalidade dos Nós assinalados anteriormente:

1. **Operacionalidade orientada ao Evento** – a interação entres Nós é despoletada em resposta a eventos que ocorram. A detecção de um evento poderá envolver a cooperação entre diversos Nós adjacentes;
2. **Operacionalidade orientada à periodicidade temporal** – o Nó envia ciclicamente dados recolhidos pelos seus sensores, independentemente dos eventos assíncronos que possam ocorrer. O período de refrescamento é determinado pelo perfil da aplicação;
3. **Operacionalidade híbrida** – com o objectivo de tirar partido das vantagens de ambos os padrões anteriores.

2.3. Estrutura do Nó Sensor e Actuador

Representa-se na Figura 2.6 os principais módulos constituintes de um NSA. Na sua constituição mais básica, inclui-se uma unidade sensorial e de actuação, uma unidade de processamento, a unidade de comunicação e por último a unidade de fornecimento de energia.

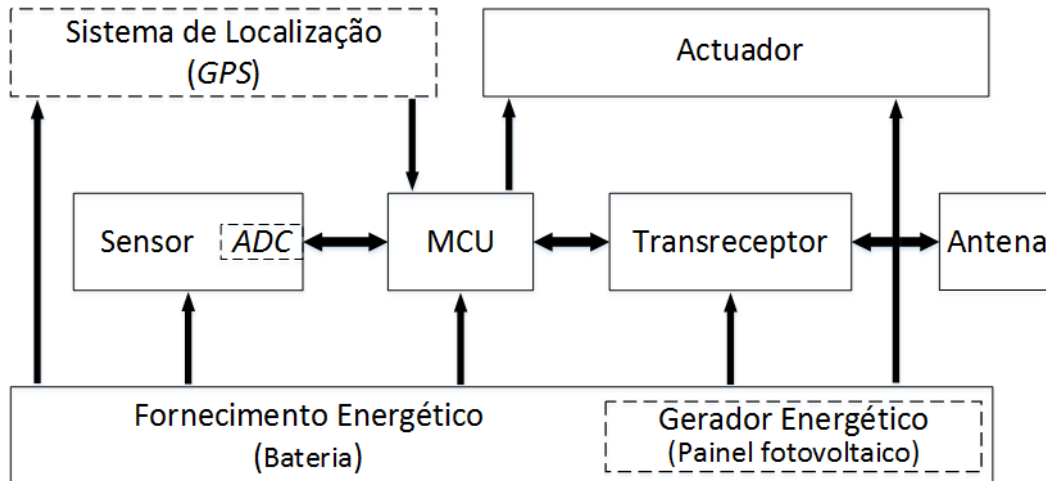


Figura 2.6- Arquitectura do NSA.

2.3.1. Unidade Sensorial e de Actuação

É nesta unidade, onde ocorre uma ligação entre o mundo real e o mundo digital, ou seja, existe uma recolha de dados associados a fenómenos do mundo real, que se pretende monitorizar pelo Nó, sendo que em seguida são convertidos em dados digitais, para que tal possam ser processados, armazenados e/ou transmitidos.

Para que a unidade sensorial possa recolher dados do meio em questão, tem de possuir um dispositivo denominado por transdutor. Este tem a tarefa de fazer a conversão de uma forma de energia para outra. De salientar que a forma de energia de saída, geralmente, eléctrica e sinal do tipo contínuo (sinal analógico). Portanto necessitando de um dispositivo que converta esse sinal (analógico) num sinal digital, para que seja perceptível pela unidade de processamento, denominado por *Analog-to-Digital Converter* (ADC).

Os tipos de sensores mais usuais são: temperatura, pressão, humidade, ph, luminosidade, humidade do solo, *Global Positioning System* (GPS), acelerómetros e electrocardiogramas.

Para além da componente sensorial, o Nó também possui actuadores. Proporcionando ao Nó a capacidade de interagir com o meio.

2.3.2. Unidade de Processamento

Basicamente a unidade de processamento é o cérebro do NSA, ou seja, reúne todos os dados recolhidos pela unidade Sensorial e Actuação, processa esses dados e executa uma acção, caso seja necessário. Podendo executar acções sobre os actuadores ou mesmo entregar os dados para a unidade de comunicação.

Como já referido anteriormente o NSA é um dispositivo com recursos escassos, portanto deve-se ter em conta os seguintes critérios: flexibilidade, performance, eficiência energética e preços, para realizar a devida selecção [10].

Uma solução é a escolha do processador, composto unicamente pela unidade central de processamento. Esta é uma solução que não é muito viável, pois tal dispositivo é muito dispendioso energeticamente como monetariamente. A solução tipicamente utilizada é a escolha de um microcontrolador (MCU), para além do processador (unidade central de processamento) contém também memória e periféricos de entrada/saída, podendo este conectar outros dispositivos (sensores), ter flexibilidade em termos de programação e baixo consumo energético. Para além destas características, o MCU tem a possibilidade de minimizar o seu consumo de energia, por exemplo nos períodos de inactividade, configurando-o para o estado *sleep* [10].

Para finalizar as famílias de MCUs mais utilizados em sistemas embebidos são:

- Texas Instruments MSP 430;
- Atmel ATmega e ATTiny;
- Microchip PIC.

2.3.3. Unidade de Comunicação Rádio

É nesta unidade onde estabelece-se a comunicação em rede, existindo a troca de dados brutos provenientes da unidade de processamento. A comunicação é sem fios, tipicamente o meio de transmissão é o ar (podendo existir aplicações debaixo de água ou mesmo debaixo de terra).

De entre as várias formas de comunicação (RF, óptica, acústica), a mais utilizada é a comunicação RF (através de um transreceptor), devido a possuir um longo alcance de comunicação, taxa de dados alta, taxa de erros aceitável, em virtude do seu baixo consumo energético, e a não necessidade de o transmissor e o receptor estarem em linha de visão (*line of sight*) para existir comunicação. De salientar que o transreceptor possui todos os elementos necessários para transmitir e receber dados (amplificadores, misturadores, filtros, etc.) [10].

A comunicação geralmente é *half-duplex*, ou seja, é bidireccional, existindo comunicação nos dois sentidos, mas em momentos diferentes (quando um Nó é transmissor o outro é receptor).

Para uma adequada escolha dos inúmeros transreceptor existentes no mercado, para uma determinada aplicação, estas são as características mais relevantes [10]:

- **Consumo e eficiência energética:** esta característica surge devido aos escassos recursos energéticos que o NSA possui e também por ser a unidade mais dispendiosa (energeticamente). Portanto o dispositivo deve ser o mais eficiente possível, relativamente aos aspectos relacionados com a troca de dados. Outro aspecto é o transreceptor possuir vários modos, com diferentes consumos energéticos, consoante as operações que executar (transmissão, recepção, *sleep*, são os modos mais comuns). Bem como possuir vários níveis de potência de transmissão, para otimizar o consumo energético e a Qualidade de Serviço (QoS) da comunicação dependentemente da distância a que se encontra dos Nós vizinhos;
- **Frequência portadora:** como o espectro electromagnético é regulamentado por entidades competentes, tem-se que ter em conta que a escolha da frequência é um parâmetro essencial, em virtude dos regulamentos impostos por estas. Escolhendo-se tipicamente, frequências que estão inseridas nas bandas *Industrial, Scientific and Medical* (ISM), pois estas são isentas de licenças;
- **Data Rates:** taxa de dados que o transreceptor pode utilizar para comunicar com equipamentos semelhantes, tendo tipicamente como unidades, bits ou símbolos por segundo;
- **Sensibilidade do receptor:** nível mínimo de potência do sinal recebido que o Receptor consegue processar, dado em dBm.

Esta unidade será apresentada em maior destaque no capítulo 3, onde se fará uma descrição pormenorizada dos vários componentes que possui, bem como a elaboração de um protótipo de teste, permitindo assim testar o seu funcionamento relativamente à componente da comunicação.

2.3.4. Unidade de Fornecimento de Energia

Esta unidade é responsável pela realização do fornecimento energético dos vários componentes existentes no NSA, podendo esta ser dividida em: armazenamento da energia e geradores de energia.

A primeira categoria é responsável pelo armazenamento e fornecimento da energia eléctrica do NSA, sendo que tal dispositivo é denominado por **bateria**. No qual as baterias mais usadas são a bateria Níquel Cádmio (Ni-Cd), Níquel Metal Hidreto (Ni-MH) e Lítio. A segunda categoria, **Geradores de Energia**, tem como função recolher energia ambiental (forma limpa, não poluente) e convertê-la em energia eléctrica, e assim fornecer carga à bateria secundária (unicamente) e/ou ao sistema a jusante.

Esta unidade será apresentada em maior destaque no capítulo 4.

2.4. Aspectos de implementação de uma WSN e Requisitos

2.4.1. Considerações Preliminares

Consumo energético

Sendo este um dos principais requisitos de uma WSN, todo sistema deverá utilizar soluções e componentes de baixo consumo médio, complementadas com módulos de captura de energia no próprio local. Entre os componentes descritos na secção 2.3, salienta-se que grande parte da energia consumida está associada à unidade de comunicação, seguida da componente referente ao actuador, unidade de processamento e por último à componente sensorial.

Seleção da faixa de frequências rádio (RF)

Para que a comunicação RF seja fiável e disponível em grande escala (operação global) é necessário que o espectro electromagnético seja administrado, regulamentado e fiscalizado por instituições como a *Federal Communications Commission* (FCC), nos EUA, ou a Autoridade Nacional de Comunicações (ANACOM), em Portugal.

De entre as várias bandas de frequência existentes, as bandas ISM são as mais utilizados dado que não necessitam de licenciamento e respectivo pagamento. A Tabela 2.1 apresenta as frequências das faixas de ISM [11].

Tabela 2.1- Frequências das Bandas ISM.

| Faixa de Frequências | Frequência Central |
|----------------------|--------------------|
| 6765-6795 kHz | 6780 kHz |
| 13553-13567 kHz | 13560 kHz |
| 26957-27283 kHz | 27120 kHz |
| 40.66-40.70 MHz | 40.68 MHz |
| 433.05-434.79 MHz | 433.92 MHz |
| 902-928 MHz | 915 MHz |
| 2 400-2 500 MHz | 2450 MHz |
| 5 725-5 875 MHz | 5800 MHz |
| 24-24.25 GHz | 24.125 GHz |
| 61-61.5 GHz | 61.25 GHz |
| 122-123 GHz | 122.5 GHz |
| 244-246 GHz | 245 GHz |

Em particular, as frequências 434 MHz e 915 MHz são as bandas ISM para a Europa e para os Estados Unidos, respectivamente. A tabela também mostra que estas faixas dispõem de largura de banda suficiente para as aplicações em estudo.

Contudo a utilização das faixas atribuídas ao ISM devem obedecer a algumas restrições técnicas, nomeadamente ao nível da potência máxima de transmissão, modulação e espaçamento espectral entre canais.

Tolerância a Falhas

Devido a inúmeras falhas que pode acontecer numa WSAN, esta tem de possuir a capacidade de suportar a funcionalidade da rede sem interrupções, independentemente da existência de falhas em alguns NSA. Essas falhas provêm essencialmente das restrições de hardware e pelo baixo custo dos componentes. Devido a essas limitações existem falhas devido aos poucos recursos que possuem, essencialmente em termos energéticos (falha de energia) e também à escassa capacidade de processamento e de espaço de memória provocando assim “paragens” de software. Para além desses problemas intrínsecos do dispositivo existem problemas associados ao meio onde estão situados, como danos físicos, interferências provocadas pela comunicação de dispositivos adjacentes, bem como os problemas que o sinal transmitido está sujeito no meio de propagação (atenuação, difracção, reflexão).

Portanto para que a WSAN seja fiável é necessário que esta possua mecanismos para tratamento das falhas que nela ocorram. Consoam as falhas (não recuperáveis) que existem nos Nós, a operação global da rede, não pode ser colocada em causa.

Uma maneira simples, mas incoerente e dispendiosa (em termos financeiros) é utilizar mais do que um NSA para uma determinada função, portanto, caso um Nó falhe, tem o outro Nó.

De salientar que a complexidade dos mecanismos a serem usados são dependentes do tipo de aplicação, ou seja, a monitorização num campo de batalha apresenta uma complexidade superior comparativamente à monitorização da temperatura de uma casa. Para além, desta estar situada num meio hostil, os dados recolhidos pelos sensores são críticos.

Auto-Manutenção

Este é um aspecto que se tem de ter em conta, pois como a WSAN oferece uma grande aplicabilidade, e este pode estar disperso em zonas onde o meio é hostil, no qual oferece diversos perigos para o bom funcionamento do NSA. Para além, destas falhas que podem ocorrer devido aos factores externos, também pode acontecer falhas devido aos escassos recursos que o Nó apresenta, de salientar para o problema mais comum o esgotamento do recurso energético.

Devido a essas circunstâncias e outras relacionadas com o ser Humano (encarecer o projecto da WSAN devido às despesas de deslocamento e de estadia, entre outras e também devido ao ambiente não suportado por este). A rede tem de possuir a capacidade de fazer a sua própria manutenção. Ele

tem de se auto monitorizar e ser flexível para contornar os problemas que surjam. Por exemplo, caso existe poucos recursos energéticos o NSA pode diminuir o nível da potência de transmissão.

2.4.2. Fases de Implementação de uma WSN

A implementação de uma rede WSN divide-se em três fases:

- 1. Fase de Instalação:** esta fase, não está relacionada implicitamente com os mecanismos necessário que a rede deve possuir para ultrapassar os desafios que apareçam, mas como os Nós devem estar localizados e como são dispersos na região onde vão operar. Podendo ser lançado via aérea, por intermédio de um avião, em grande escala ou colocados individualmente pelo Humano. De salientar, que nesta fase deve-se ter em conta em utilizar métodos para reduzir os custos da sua instalação e uma planificação (geográfica) dos Nós para que esta consiga ser flexível e tolerante a falhas;
- 2. Fase de Pós Instalação:** depois da introdução da WSN no terreno, vão começar a surgir problemas, no qual a WSN tem que ter mecanismo para tentar ultrapassá-los. Sendo que um aspecto primordial é possuir a capacidade de alterar a sua topologia (de rede), consoante as modificações que ocorram, seja problemas de comunicação (interferências, ruído, etc.), carácter físicos (já salientados em secções anteriores) ou mudanças periódicas de carácter estratégico, relacionado directamente com a aplicação em curso;
- 3. Fase Reimplantação de novos Nós:** devido aos problemas realçados na secção anterior, a WSN pode necessitar angariar mais Nós, para não colocar em risco o funcionamento da rede. Então a rede deve reestruturar a sua topologia de rede, contabilizando os novos elementos.

2.5. Tópicos Avançados

2.5.1. Técnicas de Optimização

Os limitados recursos energéticos ao dispor de uma WSN devem ser geridos de forma eficiente e optimizada. A optimização de uma rede deste tipo é obtida transversalmente, isto é, não deverá apenas ter conta o Nó individual como também o seu funcionamento em rede. Por exemplo, a configuração relativa ao estado de actividade do sistema deverá não só definir tempos de actividade e inactividade para comunicação entre Nós (coordenação/sincronismo) com também estes tempos deverão ser optimizados para o sistema visto como um todo. Identificam-se três vectores de optimização no que diz respeito à gestão da actividade da rede:

- Planificação da Rede;
- Controlo da Potência de Transmissão;
- Controlo de Actividade;

Planificação da Rede

Como a WSN é um conjunto de Nós distribuído espacialmente, tem de possuir mecanismos de reconhecimento dos dispositivos vizinhos, passando pela identificação (*naming*) e endereço lógico (*addressing*), e pela localização espacial (relativa ou não).

O *naming* e o *addressing* é essencialmente para diferenciar os vários elementos (Nós) existentes na rede e proporcionar detalhes que auxiliem na comunicação entre dois elementos da rede. Como os NSA estão dispersos, e geralmente não dispõem de dados sobre a sua localização nem a dos seus vizinhos, causando:

- dificuldades de comunicação (encaminhamento), podendo resultar em enormes gastos energéticos e diminuição da QoS, causados por interferências de comunicação de dispositivos vizinhos;
- degradação da QoS, não reportando informação suficiente.

Numa WSN, a localização pode ser dividida em duas categorias [12]:

1. Centralizada: o Nó envia uma mensagem específica para o Nó central, este como conhece a sua posição, faz uma estimativa da localização do Nó, enviando-lhe uma mensagem com a informação da sua localização.
2. Distribuída: cada Nó determina a sua própria localização, sendo esta classificada em duas categorias: *range-based* e *range-free*. Na *Range-based* a localização é estimada com base na distância entre os Nós vizinhos. Por outro lado, a categoria *Range-free* o Nó conhece a sua localização, pela estimação que faz, em virtude das mensagens de

controlo enviadas periodicamente por Nós vizinhos, sendo que estes conhecem a sua própria localização.

Do ponto de vista da implementação, a solução baseada em geo-posicionamento GPS tem utilização moderada devido ao custo associado do dispositivo receptor e ao seu consumo energético, [6].

Uma solução alternativa mais simples mapeia o posicionamento dos Nós, tendo por base o nível do sinal rádio recebido. No receptor, este nível de sinal é medido e representado pelo *Received Signal Strength Indicator* (RSSI). Com este indicador, o NSA estima a distância do Nó vizinho processando a informação sobre o nível de potência do sinal recebido, conhecimento da potência de transmissão e o modelo das perdas no percurso (nomeadamente utilizando por o modelo *Free-Space Path Loss* (FSPL). Neste último, verifica-se que a atenuação do sinal no canal de rádio é proporcional ao inverso do quadrado da distância entre o transmissor e o receptor, em espaço livre (sem obstáculos e desprezando reflexões).

Controlo da Potência de Transmissão

Define o nível de potência que deve ser utilizada para que exista uma adequada comunicação entre os NSA da rede. Naturalmente que este nível está directamente relacionado com a distância entre o Nó Fonte e o Nó Receptor, da densidade da WSAN, da geografia da região e também com a autonomia da rede. Na generalidade dos cenários (excluindo-se, por exemplo, o factor geográfico), o aumento da potência de emissão permite aumentar a área de cobertura mas em simultâneo potência o incremento do nível de interferências em redes muito densas. Por outro lado, ao diminuir a potência de emissão é possível aumentar a autonomia da rede, mas à custa da diminuição da área coberta. Verifica-se assim que o controlo de potência é um aspecto chave a ter em conta no processo de optimização da rede.

Na Figura 2.7 é mostrado um cenário rural inserido num contexto geográfico desfavorável a propagação em linha de vista.

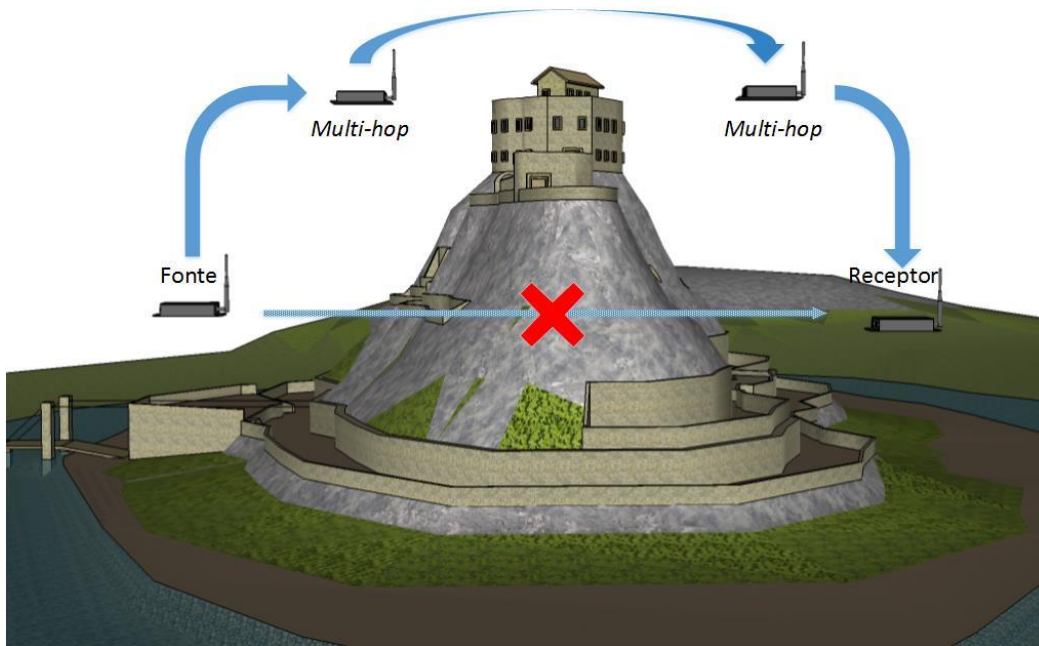


Figura 2.7- Comunicação *Multi-hop*.

Dadas as limitações (representado na Figura 2.7) impostas pelo obstáculo físico, o sinal transmitido sofre uma forte atenuação e, por esse motivo, não é exequível que exista uma comunicação directa entre a Fonte e o Receptor. Para contornar esse problema é necessário inserir um conjunto de Nós adicionais na cadeia, tendo estes a função de retransmitir as mensagens enviadas pela Fonte, em regime de **multi-hop**. Conclui-se que aumentando o número de elementos da rede operando em regime colaborativo é possível superar os problemas associados aos obstáculos existentes no percurso. Por outro lado, o Nó originador poderá emitir num nível de potência mais baixo o que contribui positivamente para a sua autonomia.

Para além da comunicação *multi-hop*, a WSN deve integrar mecanismos que lhe permita interagir com outras tecnologias de informações, permitindo assim aumentar a sua cobertura e utilizar infra-estruturas já existentes. Para que tal seja possível é necessário utilizar um dispositivo que estabeleça a ponte entre os sistemas, designado por **Gateway** [10]. Este último é responsável por remeter os dados recolhidos pela WSN para plataformas online passando estes a estarem disponíveis em tempo real e através da utilização de um simples browser, como se pode visualizar na Figura 2.8.

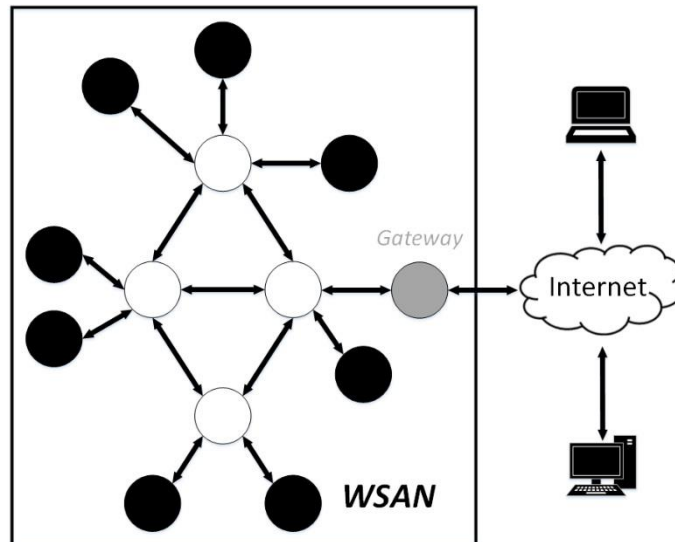


Figura 2.8- Comunicação utilizando *Multi-hop* e conceito *Gateway*.

Para que o Nó **Gateway** possa estabelecer a comunicação entre duas redes distintas deverá integrar um interface rádio e um interface que lhe permita aceder à Internet (por exemplo IEEE 802.11). Dependendo das aplicações pode-se usar-se as seguintes abordagens:

- comunicação da WSAN para um utilizador remoto, utilizando a Internet (Figura 2.8);
- comunicação da Internet para a WSAN, por exemplo, na resposta ao pedido de informação emitido pelo Nó remoto;
- Utilizar a Internet como túnel de comunicação entre as WSANs.

De salientar que a implementação de uma *gateway* é complexa dado que o nível de conversão de informação entre os dois sistemas poderá chegar ao nível de aplicação, situação em que este se comporta como um verdadeiro tradutor “linguístico” entre as duas redes (WSAN e Internet).

Controlo de Actividade

O consumo energético é uma preocupação que deve estar presente na implementação de uma WSAN. Em primeiro lugar encontra-se o desenvolvimento de mecanismos que optimizam a eficiência energética da comunicação, estando estes relacionados com o momento adequado de transmissão, encaminhamento de dados na rede, entre outros. Em segundo lugar, é normalmente possível identificar os pontos da rede com menor eficiência. Ao localizar estes pontos, procede-se de forma a eliminá-los. Estes assuntos serão abordados em maior detalhe no capítulo 4.

2.5.2. Transreceptor Rádio Cognitivo

Em virtude da densidade espectral que a tecnologia de transmissão sem fios possui. Pode-se recorrer essencialmente às várias bandas ISM (referenciado na secção 2.4.1). Utilizá-las com o propósito de aumentar a QdS, transferência de dados com a menor taxa de erros, tendo em segundo plano, o menor consumo energético.

A utilização mais eficiente do espectro disponível passa pela utilização de mecanismos de acesso dinâmico ao espectro, *Dynamic spectrum access*. Um dos exemplos desta abordagem foi elaborada no âmbito da *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA), denominada por *NeXt Generation* (xG) [13]. Este acesso só é possível com recurso a técnicas cognitivas que permitam ao transreceptor fazer uma avaliação prévia do grau de utilização espectral.

A técnica de rádio cognitivo pressupõe uma forte capacidade de interacção espectral assim como a existência de mecanismos de auto configuração (por exemplo, alterar a frequência). É uma tarefa que não envolve apenas a monitorização de uma determinada faixa, mas sim de gama alargada de canais. O intuito é evitar interferências com outros utilizadores (na fase de transmissão da mensagem). Após a fase de detecção segue-se selecção da faixa de frequência mais favorável para a transmissão. Nesse cenário, o rádio reconfigura-se automaticamente.

Este é um mecanismo que possui bastantes vantagens, mas é complexo de implementar. Na verdade, diversos desafios são colocados ao nível reconfigurabilidade do hardware (por exemplo, alteração das frequências de corte dos filtros de recepção) e ao nível dos protocolos de comunicação.

3. Comunicação Digital Rádio

3.1. Caracterização de uma ligação Rádio

Como mencionado anteriormente, a norma ISM define um conjunto de canais rádio de acesso livre, sendo por isso de utilização muito frequente na rede do tipo WSAAN.

Para além da definição dos canais de acesso livre, a norma ISM impõe um conjunto de restrições que incluem, nomeadamente limitações ao nível da potência de emissão. Por exemplo, para a faixa regulada pela FCC entre os 902 e os 928 MHz fixam-se os seguintes limites para potência de emissão [14]:

- potência de saída máxima do transmissor que alimenta a antena está limitada a +30 dBm (1 watt).
- *Effective Isotropic Radiated Power* (EIRP) deverá ser inferior a +36 dBm (4 watt).

Para que o equipamento a projectar cumpra a norma ISM, é importante efectuar-se uma análise prévia sobre a ligação rádio mais desfavorável existente no sistema. Considera-se assim dois equipamentos distanciados de 40 km, conforme se representa na Figura 3.1.



Figura 3.1- Exemplo de uma análise da comunicação sem fios.

A principal ferramenta utilizada para o dimensionamento de um sistema de comunicação sem fios é o *Link Budget*. O principal objectivo deste procedimento é determinar o nível e a qualidade do sinal recebido contabilizando diversos fatores intervenientes no processo, nomeadamente a potência de emissão, a atenuação devido à propagação, o ganho e as atenuações relacionados com o transmissor, receptor, linhas de transmissão e antena. De realçar, que para estas distâncias não se contabilizam os efeitos de curvatura da Terra.

Antes de se prosseguir para o cálculo propriamente dito, enumeram-se um conjunto de conceitos considerados fundamentais.

Free-Space Path Loss (FSPL)

Como o próprio nome indica, esta corresponde à atenuação devido à propagação em espaço livre, sendo esta degradação de sinal dependente da frequência da portadora, bem como da distância entre equipamentos. Esta atenuação é fortemente determinada pela distância de programação, regendo-se pela lei do quadrado inverso, isto é, se a distância entre o transmissor e o receptor aumentar para o dobro, o nível da potência recebido no receptor será um quarto da potência que iria receber (mais propriamente uma relação de 6 dB). Portanto, estas perdas não podem ser ignoradas, nem existe nenhuma forma de as mitigar.

De frisar que a FSPL não contabiliza as perdas associadas às condições atmosféricas nem por envelhecimento do equipamento, sendo que estas perdas são compensadas pela *fade margin*.

A fórmula do FSPL é dada por, [15]:

$$FSPL = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(d) \quad (\text{Eq.3.1})$$

Onde: $L_P \rightarrow$ free-space path loss em dB

$f \rightarrow$ frequência, MHz

$d \rightarrow$ distância, km

Effective Isotropic Radiated Power (EIRP)

É o nível de potência radiado por uma antena isotrópica. Sendo a soma da potência de saída do transmissor com o ganho da antena menos as perdas entre o transmissor e a antena.

Sinal de entrada máximo

É a amplitude máxima do sinal de recepção que garante que a operação de recepção não seja posta em causa. De salientar que o sinal recebido no receptor, *Receive Signal Level (RSL)*, tem de ser menor que o sinal de entrada máximo.

Receive Signal Level (RSL)

O RSL é o nível de potência do sinal à entrada do receptor, contabilizando as perdas e ganhos associadas à transmissão e recepção (cabo, conectores, antena) e das perdas em espaço livre (FSPL).

O RSL é dado pela seguinte fórmula, [16]:

$$RSL = P_0 - L_{ctx} + G_{atx} - L_{crx} + G_{arx} - FSPL \quad (\text{Eq.3.2})$$

Sendo que:

$P_0 \rightarrow$ potência de saída do transmissor (dBm)

$L_{ctx} \rightarrow$ perdas entre o transmissor e a antena (associado aos cabos, conectores em dB)

$G_{atx} \rightarrow$ ganho da antena do transmissor (dBi)

L_{crx} -> perdas entre a antena e o receptor (associado aos cabos, conectores em dB)

G_{arx} -> ganho da antena do receptor (dBi)

$FSPL$ -> *Free-Space Path Loss* (dB)

Fade Margin (FM)

Devido aos inúmeros problemas que existem na comunicação sem fios, tais como, efeitos multipercurso, condições atmosféricas (por exemplo, atenuação devido à chuva) e outras deficiências que não estão contabilizadas na fórmula FSPL. É necessário haver uma margem de segurança para garantir uma comunicação fiável e resiliente, isto é, dando margem para que o sistema se mantenha operacional em condições inesperadas e imprevisíveis. De realçar que a FM [16] é a diferença entre o RSL e a sensibilidade do receptor, Rx.

$$FM = RSL - Rx \quad (\text{Eq.3.3})$$

Cálculo do Link Budget

Para o cálculo do *Link Budget*, procede-se à realização das seguintes etapas:

1. Determinação da perda da FSPL

Pela elucidação referida anteriormente e utilizando a Eq.3.1, obteve-se a seguinte tabela para uma distância de comunicação desejada de 40 km.

Tabela 3.1- *Free-Space Path Loss*.

| Freq. (MHz) | FSPL (dB) |
|-------------|-----------|
| 40 | 96,48 |
| 434 | 117,19 |
| 915 | 123,67 |

2. Escolha *Fade Margin* (FM)

Em virtude da distância e da frequência pretendidas para o caso em estudo, considerou-se uma margem de 15 dB, para garantir comunicação rádio fiável.

3. Determinação da potência de saída do transmissor

Recorrendo-se aos dados fornecidos pelo *datasheet* do componente utilizado (TH7122) [17], analisado nos próximos capítulos. Partindo da informação fornecida pelo fabricante, o transreceptor possui uma sensibilidade de -107 dBm para a modulação *Amplitude-Shift Keying* (ASK) e -105 dBm para a modulação *Frequency-Shift Keying* (FSK).

Rx= -105 dBm (@ $BER \leq 3.10^{-3}$, $B_{IF} = 180 \text{ kHz}$)

Utilizou-se como primeira abordagem uma antena com um ganho no lóbulo principal de 0 dB e um somatório de perdas associado aos cabos e conectores entre o transmissor e a antena e entre a antena e o receptor de 3 dB ($L_{ctx} + L_{crx} = 3\text{dB}$).

Recorrendo às Eq. 3.2 e Eq. 3.3, e com os valores recolhidos de FM e Rx, obteve-se os valores registados na Tabela 3.2.

$$P_0 = FM + Rx + L_{ctx} + L_{crx} + FSPL$$

Tabela 3.2- Potência de saída do transmissor.

| Freq. (MHz) | Rx (dBm) | Po (dBm) |
|-------------|----------|----------|
| 40 | * | 9,48 |
| 434 | -105 | 30,19 |
| 915 | -105 | 36,67 |

* Na ausência de informação, utilizou-se uma sensibilidade de -105 dBm

4. Cálculo da relação sinal ruído após a recepção (SNR_o)

Para calcular o SNR do sistema em estudo, utilizou-se a seguinte expressão, [15]:

$$SNR_o = P_{out} - (-174 + 10 * \log(BW_N) + NF_{rx} + L_{crx}) \quad (\text{Eq.3.4})$$

Sendo que:

SNR_o -> SNR presente na saída do receptor (dB)

P_{out} -> nível de potência disponível na saída do receptor (dBm)

BW_N -> largura de banda da *intermediate frequency IF* (Hz)

NF_{rx} -> *Noise Figure* (NF) do receptor (dB)

L_{crx} -> Perdas entre a antena e o receptor (associado aos cabos, conectores em dB)

Como no *datasheet* do transreceptor TH7122 não está disponível o valor do NF_{rx} , teve-se que utilizar o seguinte raciocínio e utilizar a seguinte equação [18] (relativamente à modulação FSK).

$$\begin{aligned} FSK). \quad BER &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{2 \cdot N_0}} \right) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow SNR = 2(\operatorname{erfc}^{-1}(2 \cdot BER))^2 \end{aligned} \quad (\text{Eq.3.5})$$

Sendo que o *Bit Error Rate* (BER) como foi dito anteriormente é menor ou igual a $3 \cdot 10^{-3}$ e erfc é a função complementar de erro dada pela expressão, $\operatorname{erfc} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$.

Resolvendo a equação anterior (Eq.3.5) obteve-se uma SNR de 8,8 dB.

Calculando em seguida o ruído térmico (N_T) para uma temperatura de 23 °C e uma largura de banda de 180 kHz obteve-se: $N_T = kTB = -121,33 \text{ dBm}$.

Onde k é a constante de *Boltzmann*, T a temperatura em *Kelvin* e B a largura de banda em Hz.

Portanto para calcular a ruído no receptor utilizou-se a seguinte equação:

$$NF_{rx} = Rx - SNR - N_T = -105 - 8,8 + 121,33 \Leftrightarrow NF_{rx} = 7,5 \text{ dB}$$

Finalmente e assumindo que o nível de potência à entrada é igual à de saída no receptor, obteve-se um $SNR_o = 7,42 \text{ dB}$, sendo este o valor mínimo. Ignorou-se o ganho e as perdas associados aos componentes inseridos no *front-end*.

Considerações Finais

Com base nos conceitos mais relevantes para a caracterização da propagação rádio é possível estabelecer uma análise do orçamento de uma ligação rádio em 915 MHz, e para um alcance de 40 km, conforme representado na Figura 3.1. Considerando uma potência máxima do circuito emissor de $P_0 = +30\text{dBm}$ (Tabela 3.2), é necessário incluir uma antena com ganho de $G_{atx} = 6 \text{ dBi}$. Em virtude da EIRP ser a soma (em dB) do P_0 com G_{atx} descontando as perdas associadas entre o transmissor e a antena, o que resulta num total $EIRP = +34,5 \text{ dBm}$. Considerando este nível de EIRP, o sinal junto à antena de recepção é de -104 dBm , depois de descontada a atenuação do sinal ao longo do percurso, estimada num total de -138 dB (que inclui o FSPL e FM de -15 dB). Contabilizando, de seguida, o ganho da antena receptora e as perdas associadas entre a antena e o circuito receptor, obteve-se uma potência na entrada do amplificador de baixo ruído (LNA) de $-99,67 \text{ dBm}$. Como esta potência é maior que o patamar de sensibilidade ($Rx = -105 \text{ dBm}$) garante-se assim uma comunicação fiável com uma margem de segurança a rondar os 5 dB .

Procedendo de igual modo para um canal com frequência mais alta, mantendo os restantes parâmetros (antenas com ganho de 6 dBi e a potência de emissão de $+30 \text{ dBm}$), obtêm-se resultados comparáveis aos anteriores em termos da fiabilidade comunicação.

Para o caso das frequências europeias, ou seja, para 40 e 434 MHz , consultando o Quadro Nacional de Atribuição de Frequência (QNAF) [19], atribuído pela ANACOM, verifica-se que o nível de potência aparente radiada é no máximo de 10 mW ($+10 \text{ dBm}$). Atendendo a esta restrição e recordando os valores da Tabela 3.2, para 40 MHz , é necessário um $P_0 = 9,48 \text{ dBm}$ e para 434 MHz $P_0 = 30,19 \text{ dBm}$. Para o caso de 40 MHz , a potência de saída é menor do que a máxima permitida. No entanto, para 434 MHz , a potência necessária é manifestamente superior ao permitido, remetendo para as seguintes soluções:

- a) introdução de repetidores entre o transmissor e o receptor;
- b) modificação das características associadas ao transreceptor, nomeadamente, referente à sensibilidade, taxa de transmissão e alteração da modulação.
- c) alocar a frequência numa rede privada por exemplo na “Rede Privada do Serviço Móvel Terrestre (SMT/RP)” que tem um limite máximo de potência aparentemente radiada de 2 W ($+33 \text{ dBm}$) para uma frequência de 468 MHz .

3.2. Módulo de Comunicação

A unidade de comunicação rádio desempenha uma função vital na WSN, justificando por isso uma cuidada selecção do circuito integrado com transreceptor, para o qual se demonstra a importância das seguintes características [10]:

- **Consumo e eficiência energética**, sendo uma especificação essencial tendo em conta os escassos recursos energéticos que o NSA dispõe. Todavia, a propagação do sinal rádio entre o emissor e o receptor necessita de uma quantidade mínima de energia o que torna este bloco um dos mais críticos em termos do seu consumo. Por isso, a eficiência do subsistema transreceptor deverá ser garantida através da disponibilização de vários modos de funcionamento com diferentes consumos. Estes modos são dinamicamente ativados consoante as operações a executar, nomeadamente transmissão, recepção ou modo espera ou adormecido. Além disso, a disponibilização de vários níveis de potência de emissão contribui decisivamente para otimizar o consumo energético;
- **Selectividade da frequência do canal**, escolhendo-se tipicamente frequências definidas na norma ISM, pois estas são isentas de licenças (referido no capítulo anterior);
- **Taxa de transmissão de dados**: taxa de transferência digital de dados que o transreceptor pode utilizar para comunicar com equipamentos análogos, em bits ou símbolos por segundo;
- **Sensibilidade do receptor**: nível mínimo de potência do sinal que o receptor tem capacidade de detectar e processar, sendo habitualmente fornecido em dBm.

Atendendo aos requisitos anteriores e pelo carácter versátil do circuito integrado (como se pode visualizar na Figura 3.2) e do seu manual [17], seleccionou-se o transreceptor da Melexis denominado por TH7122. De salientar, os bons resultados obtidos pelo TH7122 no *Sensor Note* (JCUMote) descrito em [20] e [21], onde foi demonstrado a operacionalidade para distâncias de comunicação na ordem dos 10 km, em ambiente rural.

Para além destas características, o transreceptor cobre uma ampla faixa espectral, podendo variar a sua frequência entre os 27 e os 930 MHz. Permite, igualmente, dois modos de operação, designadamente um modo autónomo (*stand-alone*) ou modo de comando via interface série. Em modo autónomo este integrado disponibiliza um conjunto de frequências pré-fixadas para utilização em redes ISM, nomeadamente 315 MHz, 433,92 MHz, 868,3 MHz e 915 MHz. Em modo de comando, este integrado permite utilizar toda a gama espectral suportada pois integra uma malha de captura fase (PLL) muito versátil. De salientar que só neste modo de operação é que o TH7122 pode transmitir com frequências de rádio inferiores a 300 MHz. Para além disso, este permite alterar dinamicamente os diferentes níveis da potência de emissão e o seu estado de operação, nomeadamente transmissão,

recepção, *standby* e *Idle*. A comunicação é *half-duplex*, ou seja, é bidireccional mas não em simultâneo (quando um Nó é transmissor o outro é receptor).

Como se pode visualizar pela Figura 3.2, o transreceptor é constituído essencialmente pelos seguintes de blocos:

- malha de Captura de Fase (*Phase Locked Loop* - PLL);
- bloco receptor;
- bloco transmissor.

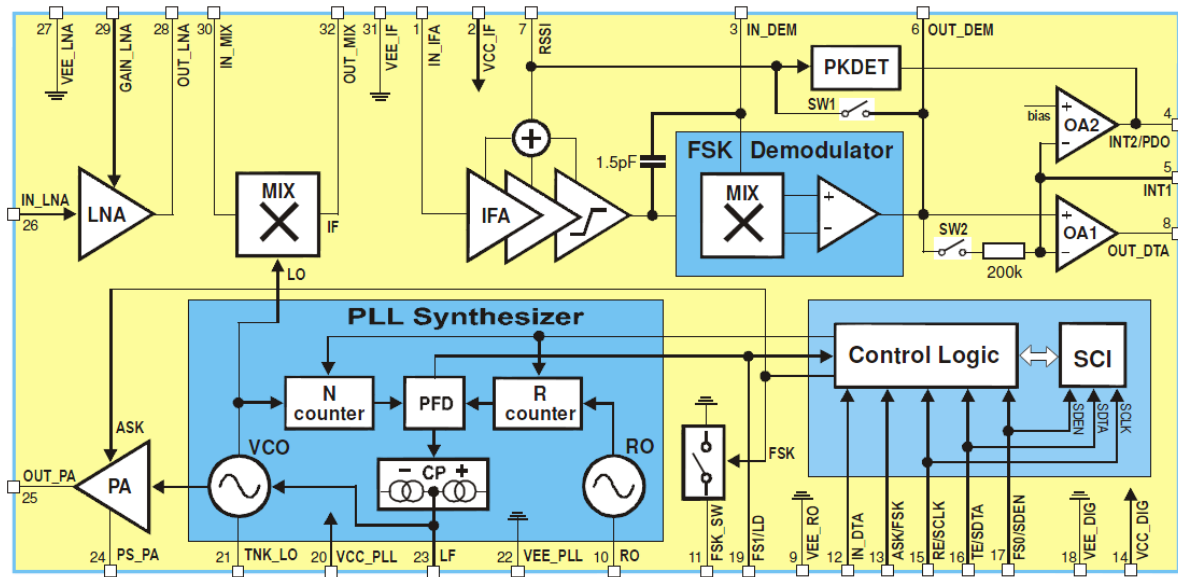


Figura 3.2- Diagrama de blocos do transreceptor (a partir de [17]).

O PLL é um bloco fundamental dado que garante não só a geração do sinal rádio como também a sua estabilidade. No caso em estudo, o PLL é baseado numa topologia “*Integer-N*” como se pode visualizar na Figura 3.3.

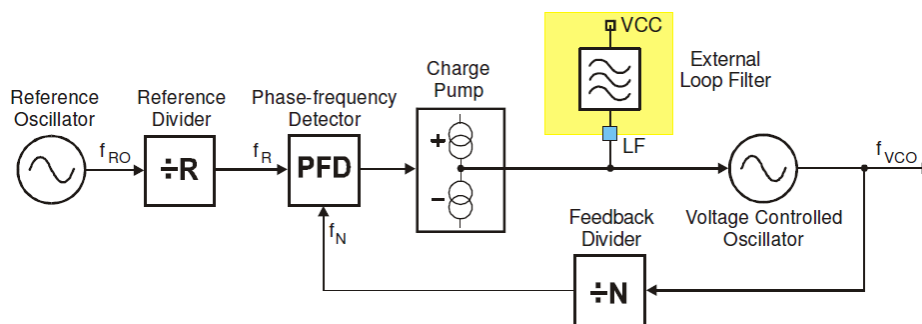


Figura 3.3- Topologia *Integer-N* (a partir de [17]).

A frequência do oscilador controlado por tensão (VCO), f_{VCO} , é ajustada e estabilizada pelo PLL a partir de um cristal externo (com frequência de referência, f_{RO}) recorrendo a uma realimentação de fase. Internamente, o VCO baseia-se numa configuração do tipo *Colpitts* com regulação da amplitude de saída, de modo a garantir uma frequência estável face a variações da tensão de alimentação ou de

temperatura. Este comportamento é obtido a partir da monitorização da amplitude do sinal da f_{RO} , regulando-a através da alteração do valor da corrente do oscilador. A gama de valores da corrente varia entre ROMAX e ROMIN, podendo estes serem alterados por programação. ROMAX estabelece a corrente no arranque e ROMIN a corrente em regime permanente. O valor da corrente é alterado para ROMIN, caso a amplitude do sinal da f_{RO} seja 0,4 V. Caso contrário, o valor da corrente está compreendida entre ROMAX e ROMIN.

Em seguida, o detector de frequência e fase (**Phase-Frequency Detector - PFD**) em conjunto com a bomba de carga (**Charge Pump - CP**) geram um sinal que é proporcional à diferença da fase de dois sinais. Esses sinais estão associados à frequência de resolução, f_R , e à frequência de *feedback* f_N , e são directamente afetados pelo factor de resolução, R, e pelo factor de *feedback*, N, respectivamente. A f_N utiliza um divisor inteiro por N na malha de realimentação e a f_R corresponde à divisão inteira pelo factor R, $f_r = \frac{f_{RO}}{R}$. Este sinal não pode ter um valor muito baixo, pois define o tempo de actualização da malha ($\frac{1}{f_r}$). Caso esse valor seja muito baixo, aumenta o tempo de estabelecimento e reduz a capacidade de cancelar as perturbações do VCO.

A frequência de saída do PLL, f_{VCO} , no estado *lock* é dado por:

$$f_{VCO} = N \frac{f_{RO}}{R}$$

O sinal de erro criado pelo PFD e CP é proporcional à diferença de fase entre os sinais f_R e f_N , com ganho relacionado com a corrente do CP, I_{CP} :

$$K_{PD} = \frac{I_{CP}}{2\pi}$$

Podendo esta ser alterada via programação.

O sinal gerado no PFD é em seguida filtrado por um **filtro externo**, tendo este um papel preponderante na sintonização do VCO pois permite corrigir as perturbações de frequência.

Este filtro, com estrutura representada na Figura 3.4, tem função de transferência do tipo passa-baixo de segunda ordem.

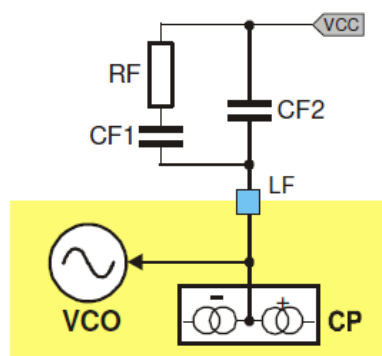


Figura 3.4- Filtro 2ª ordem (a partir de [17]).

O sinal filtrado é determina a frequência do sinal gerado no VCO, Figura 3.5

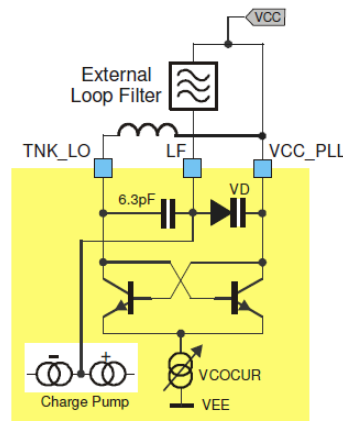


Figura 3.5- Circuito VCO (a partir de [17]).

O circuito do VCO é composto essencialmente por um condensador e por um díodo varactor. Este último elemento varia a sua capacidade dependendo da tensão aplicada aos seus terminais. Também é composto, por uma bobina externa que completa a malha de sintonia LC, cuja frequência de ressonância é $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. A sintonização/ajuste da frequência de oscilação é obtida pela variação da capacidade do varactor imposta pela tensão de saída do filtro de malha.

O VCO tem função de transferência inversamente proporcional à tensão de entrada injectada pelo filtro de malha. Quando o valor da tensão do filtro passa-baixo desce, o valor do condensador desce, devido ao valor do condensador associado ao varactor interno também diminuir. Portanto, como a capacidade diminui, a frequência vai aumentar. Resumindo quando desce a tensão, aumenta a frequência do VCO, o mesmo se aplica ao caso contrário, quando aumentar a tensão desce a frequência.

De salientar que esta análise insere-se para uma frequência de sintonização do VCO superior a 300 MHz, caso esta seja inferior é necessário incluir mais componentes, nomeadamente um varactor.

A **Parte de Recepção** do TH7122 utiliza uma arquitectura super-heteródina, sendo esta constituída pelo amplificador de baixo ruído (LNA), pelo Misturador RF, pelo Amplificador de frequência intermédia (*Intermediate Frequency Amplifier* IFA) e pelo desmodulador (*Demodulator*).

O fraco sinal de RF recebido é, primeiramente, amplificado pelo **LNA**. Este circuito é construído em torno de uma topologia *Cascode* de baixo ruído, com ganho elevado e bom isolamento. Adicionalmente, permite alterar o ganho de potência podendo assim adaptar-se dinamicamente e em tempo real às variações de sinal. A malha de adaptação externa de que necessita permite igualmente efectuar uma pré-filtragem do canal.

O circuito misturador seguinte, **Mixer**, tem como função converter o sinal do LNA para uma frequência inferior, designada por frequência intermédia, f_{IF} . O oscilador local, LO, é gerado pelo PLL. O circuito *Mixer* baseia-se numa estrutura duplamente balanceada e por omissão opera num regime

de injeção em posicionamento inferior (*low-side injection*), ou seja, a frequência do LO (f_{LO}), é inferior à frequência de recepção, $f_{LO} = f_{RX} - f_{IF}$.

O sinal convertido para uma frequência inferior (neste caso, $f_{IF} = 10,7$ MHz) é em seguida filtrado por um filtro cerâmico exterior, de elevado factor de qualidade, e amplificado pelo amplificador **IFA** em cerca de 80 dB. O nível de sinal recebido, RSSI, é disponibilizado através de uma tensão cujo o valor é proporcional à potência do sinal recebido.

Por último, o sinal é desmodulado em modo **ASK** ou, alternativamente, em modo **FSK**. A desmodulação ASK permite duas configurações possíveis, a ASK padrão e a ASK com detetor de pico.

A desmodulação ASK padrão é realizada utilizando um Amplificador Operacional (AO) numa estrutura designado por circuito *data slicer*. O *data slicer* tem como função comparar o sinal do RSSI com um valor de referência. Esse valor de referência é obtido pela filtragem passa-baixo do sinal RSSI. Portanto, caso a tensão do sinal RSSI seja maior que a tensão de referência, o sinal de saída é 1 caso contrário é 0 [22].

Para o bom funcionamento do circuito, é necessário que exista uma adequada definição da tensão de referência. Tendo para isso existir uma constante de tempo, T , dada por $T = 200 \text{ k}\Omega * C$, onde C é o valor do condensador externo. De salientar que a duração do bit transmitido deve ser menor que a duração desta constante de tempo T .

Para um processo mais rápido na definição da tensão de referência, pode ser utilizado a abordagem de detecção de pico, podendo esta configuração ser activada por programação.

Relativamente à desmodulação FSK, esta é baseada no princípio *phase-coincidence*, necessitando de um filtro externo. Utilizou-se, como recomendado, um discriminador cerâmico. O sinal filtrado pelo discriminador é processado pelo circuito *data slicer*.

Internamente, um circuito *Automatic Frequency Control* (AFC), este é responsável por fazer a sintonização para a frequência de recepção. Uma das principais razões da perda de sincronismo é devido as variações de temperatura e também à não precisão dos componentes [23]. Este método pode ser activado via programação, por omissão está desactivado.

A **parte de transmissão** é constituída pelo amplificador de potência (PA) e pelo modulador ASK ou FSK. O PA baseia-se configuração de colector aberto podendo ser utilizado em classe A ou C. É projectado para fornecer uma potência máxima de saída de 10 dBm. O nível de potência pode ser alterado via programação, em 4 níveis, sendo que a frequência de emissão é determinada pelo PLL. Por sua vez, a malha LC externa polariza o transístor de saída assim como tem funções de filtragem do sinal.

O nível de potência máxima de saída do PA é determinado pela impedância externa, cuja parte real é representada por R_L , sendo que a eficiência do PA está fortemente relacionada com este valor. O valor de R_L , é determinado através da expressão dada por,

$$R_L = \frac{(V_{CC} - V_{CE_{SAT}})^2}{2 \times P_o}, V_{CE_{SAT}} = 0,7 V$$

Em que P_o é potência de emissão, V_{CC} a tensão de alimentação e $V_{CE_{sat}}$ tensão de saturação do transistor.

A **Modulação** como referido anteriormente pode ser ASK ou FSK, podendo esta ser seleccionada via externa (pino ASK/FSK) ou por programação.

A **Modulação ASK** utiliza directamente o PA como elemento modulador, entrando em modo activo para bit 1 e desactivando-se para o bit 0.

Por sua vez, a **Modulação FSK** pode ser obtida via *crystal pulling* ou por controlo directo do VCO. A primeira abordagem consiste na alteração, através de um interruptor, da frequência de ressonância da malha com o cristal, conforme se ilustra na Figura 3.6.

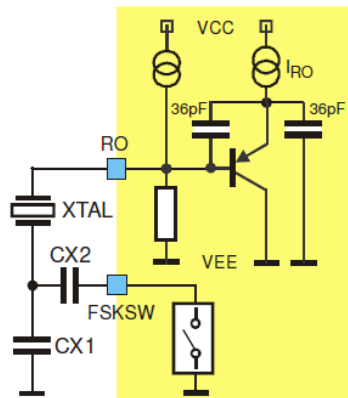


Figura 3.6- Circuito *crystal pulling* (a partir de [17]).

Caso o sinal a modular corresponda ao bit 0, o interruptor está fechado, provocando assim um aumento da capacidade efectiva, o que provoca uma diminuição da frequência do cristal, f_c .

Por outro lado, se o bit for 1, o interruptor está aberto, a capacidade diminui o que provoca um aumento da frequência. Em suma, o comportamento é descrito por.

$$\text{Sinal 0} \rightarrow f_{min} = f_c - \Delta f$$

$$\text{Sinal 1} \rightarrow f_{max} = f_c + \Delta f$$

3.3. Desenvolvimento do primeiro protótipo da Placa de Comunicação

Com o intuito de se proceder ao ensaio/teste da unidade de comunicação referida na secção anterior, foi projectada uma primeira versão do módulo de comunicações com o Melexis TH7122, em tecnologia de placa de circuito impresso (*Printed Circuit Board* - PCB).

3.3.1. Esquemático do Circuito

O esquemático proposto assenta numa lógica de flexibilidade de configuração tirando partido de todas as potencialidade do circuito integrado seleccionado.

O transceptor dispõe de dois modos de **modulação (ASK/FSK)** e cada um deles possui um circuito associado. Um simples selector manual permite a ativação da modulação pretendida, conforme se representa nas três figuras seguintes, Figuras 3.7 a 3.9.

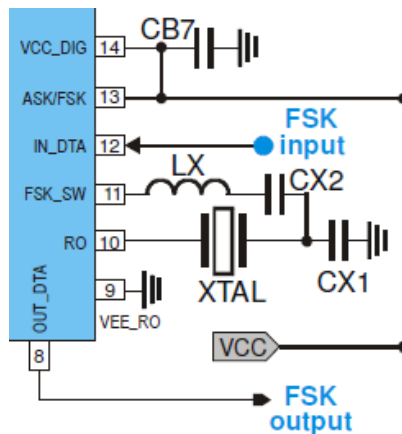


Figura 3.7- Modulação FSK.

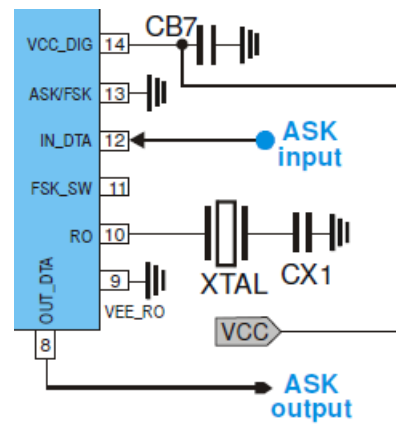


Figura 3.8- Modulação ASK.

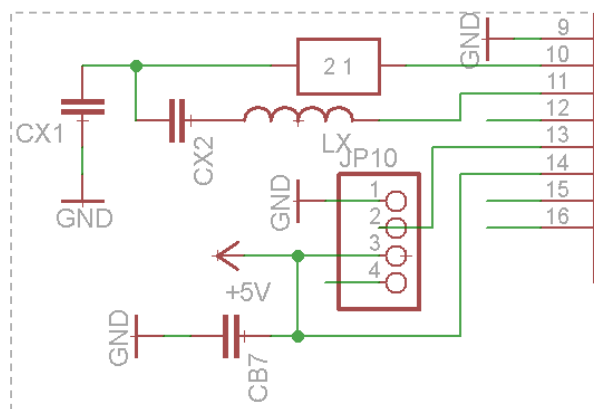


Figura 3.9- Solução para integrar as duas modulações (programa Eagle).

Na modulação FSK, o uso dos dois condensadores “CX1” e “CX2” tem como objectivo alterar o valor da capacidade efectiva do cristal através do interruptor, conforme já explicado anteriormente.

Relativamente à malha LC do VCO do **PLL**, para frequências superiores a 300 MHz utiliza-se o circuito LC representado na Figura 3.10. Para frequências inferiores, o circuito necessita de um circuito

externo como um varicap (de modo a aumentar o valor da capacidade total da malha ressonante)

Figura 3.11.

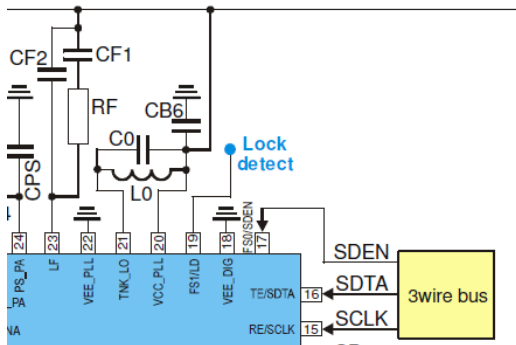


Figura 3.10- Esquema para frequências superiores a 300 MHz.

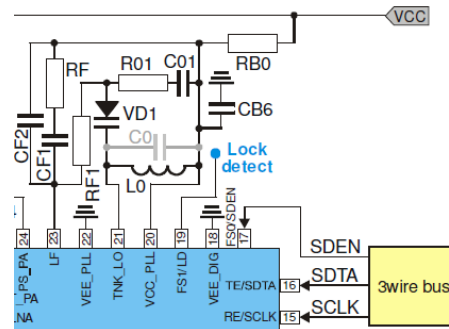


Figura 3.11- Esquema para frequências inferiores a 300 MHz.

Baseado no circuito Figura 3.11, representa-se na Figura 3.12 o circuito final desenhado (neste esquemático o varactor é representado pelo rectângulo identificado por “1 2”).

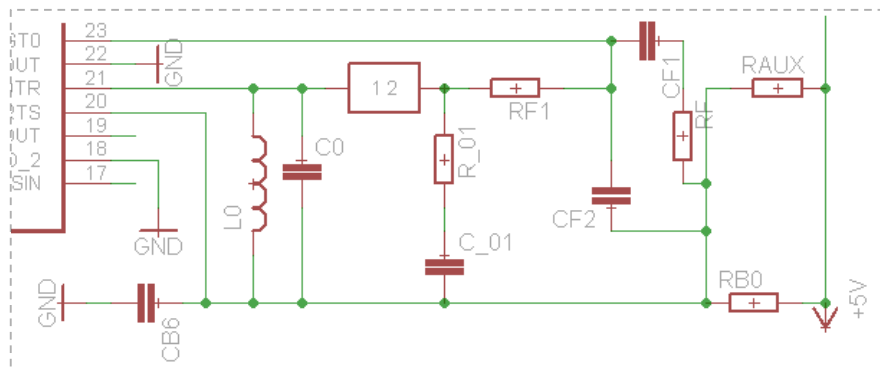


Figura 3.12- Solução para integrar as duas gamas de frequências (Eagle).

O filtro de malha é constituído pelos elementos “RF”, “CF1” e “CF2” e desempenha uma função fundamental no funcionamento do PLL. Para o caso da modulação FSK, a largura de banda deste filtro deverá ser muito estreita, para que exista uma operação estável no PLL. Como o espaçamento entre canais é muito pequeno, o ruído de fase do VCO torna-se num elemento que tem de ser tomado em consideração.

O dimensionamento do filtro de malha de segunda ordem ilustrado na Figura 3.13 depende da sensibilidade do VCO, K_{VCO} , e do ganho do detector de fase, K_{PD} .

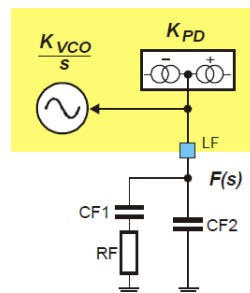


Figura 3.13- Filtro de Segunda Ordem (a partir de [24]).

Atendendo aos dados obtidos em [24] e [25], K_{VCO} para a frequência de 434 MHz varia entre 14 e 22 MHz/V. Por outro lado, $K_{PD} = \frac{I_{PD}}{2\pi}$. Recorrendo à função de transferência do filtro, temos as seguintes expressões para a frequência do pólo e para o zero [24]:

$$\omega_z = \frac{1}{R_F C_{F1}}; \omega_p = \frac{C_{F1} + C_{F2}}{R_F C_{F1} C_{F2}}$$

A largura de banda (3dB) do PLL em malha fechada pode ser aproximada à *transit frequency*, ω_T , do *loop filter*, caso $C_{F2} \ll C_{F1}$, sendo ω_T dado por [24],

$$\omega_T \simeq \frac{K_{VCO} K_{PD} R_F}{N} \frac{C_{F1}}{C_{F1} + C_{F2}} \simeq \frac{K_{VCO} K_{PD} R_F}{N}$$

onde o N é o factor de divisão da malha de realimentação.

Para que a malha seja estável, tem de apresentar uma Margem de Fase (MF) entre os 30 e os 70 graus. Portanto para garantir que a malha seja estável à frequência, ω_T , coloca-se a frequência do zero M vezes inferior e a frequência do pólo M vezes superior. Com $M = 2,5$ garante-se uma MF aproximadamente de 45 graus [24]. Partindo dos dados anteriores, os valores dos componentes do filtro são dados por $R_F = \frac{N}{K_{VCO} K_{PD}} \omega_T$, $C_{F1} = \frac{M}{R_F \omega_T}$ e $C_{F2} = \frac{1}{M R_F \omega_T}$.

O varactor interno da malha de ressonância LC do VCO apresenta uma capacidade mínima de 3,06 pF [26] para uma tensão de 5 V. É com base neste conhecimento que o dimensionamento da bobina externa ("LO") é feito para uma determinada frequência de ressonância da malha LC do VCO.

Ao incluir condensadores em paralelo com o circuito básico de sintonização, estes possuem como função estabilizarem o VCO, diminuindo as perturbações de frequências causadas essencialmente pela comutação do PA. Ao incluir estes condensadores possuem como desvantagem diminuir a gama de sintonização. Caso a capacidade do varactor inserido externamente seja grande a 0 V, o valor do condensador ("C_01") deve ser pequeno [26].

Para diminuir o ruído de fase do VCO é necessário aumentar o factor de qualidade Q da malha LC. Dado que, genericamente, $Q = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$ (para RLC paralelo), o aumento do factor de qualidade pode ser obtido através da utilização de bobines com baixas perdas e valores de indutância reduzidos. No entanto, estes valores estão fortemente condicionados pelos elementos parasitas do encapsulamento do circuito integrado e do PCB.

Relativamente à modulação, a placa pode ser utilizada em modo ASK ou FSK. No modo FSK usa o modo indirecto, ou seja, a frequência do cristal varia consoante a variação da capacidade efectiva, que está relacionada com a comutação do interruptor, dependendo do valor do bit a ser modulado (pino IN_DTA). Na modulação ASK os dados a serem modulados vão influenciar o estado do PA (ligado/desligado). De salientar que o PA possui um condensador ("CPS") em paralelo com a resistência ("RPS") com a função de diminuir o tempo subida e de descida, diminuindo as espúrias.

Na **filtragem externa da frequência intermédia**, é utilizado um filtro cerâmico (SFECF10M7HA00-R0) de elevado factor de qualidade com frequência central igual à frequência intermédia de 10,7 MHz, com uma largura de banda (a 3dB) de 180 kHz e uma resistência de entrada/saída de 330 Ω . Dado que à saída do misturador apresenta igualmente uma impedância 330 Ω , fica garantida a adaptação entre estes dois componentes. Por sua vez, a entrada de amplificação do sinal IF apresentada uma impedância de 2 k Ω , sendo este do tipo capacitivo (capacidade equivalente na ordem do pF). Apesar da adaptação não ser perfeita, para as modulações e taxas de transmissão utilizadas, pode-se ligar directamente a saída do filtro cerâmico ao pino de amplificação da IF [26].

Para a **desmodulação** a placa está habilitada para o modo ASK com *Bit Slicer* e com detector de pico. Tanto num caso como outro, ambas utilizam um AO para desmodularem o sinal. Este processo é realizado devido à comparação do sinal de entrada com um sinal de referência, caso seja maior corresponde ao bit 1, caso contrário bit 0. No caso do *Bit Slicer*, o sinal de referência é obtido pela filtragem passa-baixo do sinal de entrada (sinal RSSI), recorrendo a um condensador externo “C5”. No outro caso, o detector de pico necessita de um conjunto de elementos externos adicionais, conforme se indica na Figura 3.14. O princípio de funcionamento recorre a um circuito interno do detector de pico que carrega o condensador (“C6”) e com auxílio das resistências definem um valor de tensão utilizado como sinal de referência no AO [26].

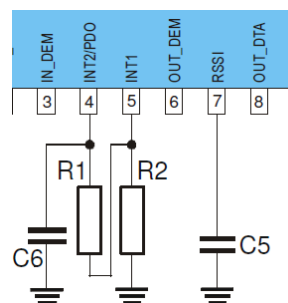


Figura 3.14- Circuito para *Peak Detector* (a partir de [17]).

Utiliza-se o detector de pico para o caso do sinal não possuir componente DC constante, como geralmente acontece para a codificação *Non-Return-to-Zero* (NRZ).

Para implementar a **desmodulação FSK** utilizou-se o circuito representado na Figura 3.15.

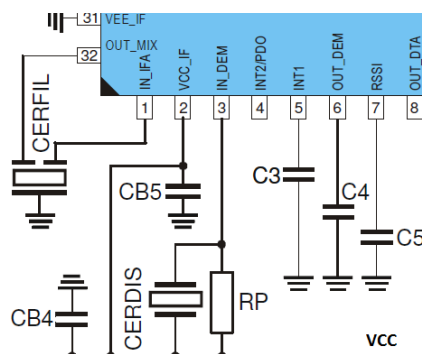


Figura 3.15- Desmodulação FSK (a partir de [17]).

A desmodulação FSK é realizada por intermédio de um discriminador cerâmico (CDSCB10M7GA136-RO), conectado à entrada do pino IN_DEM. De salientar que este discriminador cerâmico actua como uma bobina de elevado factor de qualidade Q. A resistência em paralelo com o “CERDIS” (*ceramic discriminator*) tem como função definir a largura de banda do detector. Após ser filtrado, o sinal é desmodulação internamente, sendo a saída resultante disponibilizada no pino OUT_DEM. Processo semelhante é utilizado no caso da desmodulação ASK.

O sinal entre a saída do LNA e a entrada do misturador é filtrado através de um circuito LC passa-banda para eliminar a frequência imagem. É igualmente utilizado um condensador para fazer o acoplamento para a entrada do misturador. De salientar que se podia substituir o circuito LC por um filtro *Surface Acoustic Wave* (SAW).

Pode-se visualizar na Figura 3.16 o resultado final do esquemático a ser implementado na secção seguinte.

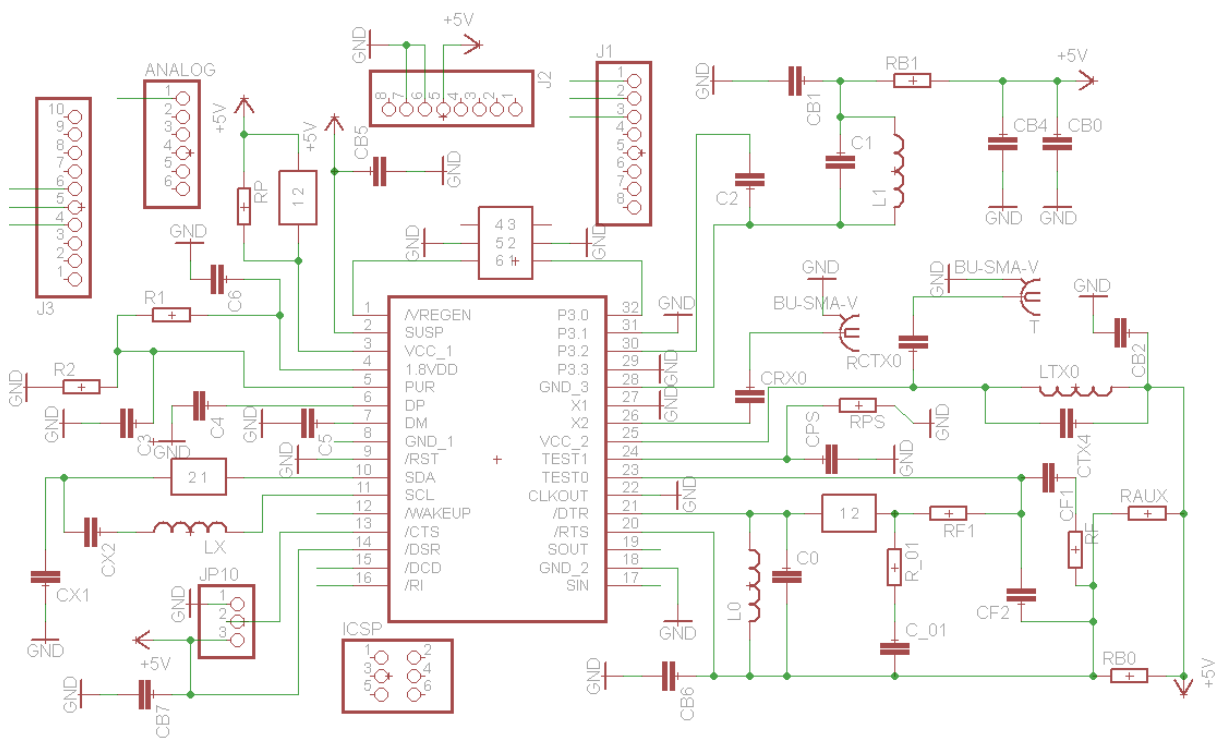


Figura 3.16- Esquemático completo da placa (Eagle).

3.3.2. Implementação do Circuito

O desenho da placa de circuito impresso de duas camadas para circuitos rádio, reflecte a necessidade de se reduzir os efeitos indesejados causados por fenómenos de interferência diversa, nomeadamente interferência electromagnética (EMI).

EMI contabiliza a propagação indesejada de energia, podendo esta ser radiada e/ou conduzida, causando efeitos colaterais indesejados. Essas interferências podem ser criadas por uma rápida comutação de fontes DC, originando picos de corrente que induzem tensões em pistas vizinhas devido à indutância mútua existente. Estes efeitos, se não devidamente atenuados, reflectem-se em perturbações significativas nos circuitos RF (por exemplo, no PA, LNA, *Mixer*).

Outro aspecto importante no desenho da placa é o caminho de retorno da corrente para a fonte de alimentação (*ground*). Em suma, enumeram-se as principais regras a utilizar no desenho de um placa PCB para rádio, [15]:

- utilizar uma distância razoável entre pistas e ou componentes, de modo a não existir interferências indesejadas (reduzir acoplamentos capacitivos e indutância mútuas);
- nas linhas de alimentação (VCC), utilizar condensadores de desacoplamento, próximo dos circuitos que vão ser alimentados, atenuando desta forma o efeito dos picos de corrente;
- para as pistas de alimentação utilizar-se pistas com uma largura razoável, com o intuito de diminuir a resistência e indutância da pista;
- utilizar um plano de massa global e enumeras vias, contribuindo para redução do comprimento efectivo do caminho de retorno para a massa;
- utilizar blindagem metálicas, nomeadamente nos geradores de sinais (ex. cristal);
- utilizar pistas para sinal RF com o menor comprimento possível. De salientar para o caso das linhas de transmissão utilizar um comprimento inferior a um décimo do comprimento de onda do sinal transmitido;
- as pistas para sinais digitais não devem ser terminadas em altas impedâncias ou em aberto. Sendo este tipo de sinal rico em harmónicas, há que dificultar o nível de radiação interferente;
- não colocar pistas muito próximas do extremo da placa, para não existir EMI, provocadas por placas/dispositivos adjacentes;
- diminuir ao mínimo o número de vias de sinal (não as vias para a massa) porque as vias possuem capacidade e indutâncias parasitas, assim como causam reflexão, associada à mudança de direcção do sinal [27];
- separar os diferentes tipos de pistas não colocando, por exemplo, as pistas digitais próximo das pistas de sinal RF;
- Utilizar curvatura de 45 graus para as pistas, diminuindo assim descontinuidade de impedância e reflexões de sinais, [27].

Aplicando as indicações descritas anteriormente, representa-se na Figura 3.17 o desenho final da placa para o protótipo de testes. A cadeia de conectores laterais permite a ligação directa à plataforma Arduino [28], possibilitando o acesso a um conjunto avançado de ferramentas de teste.

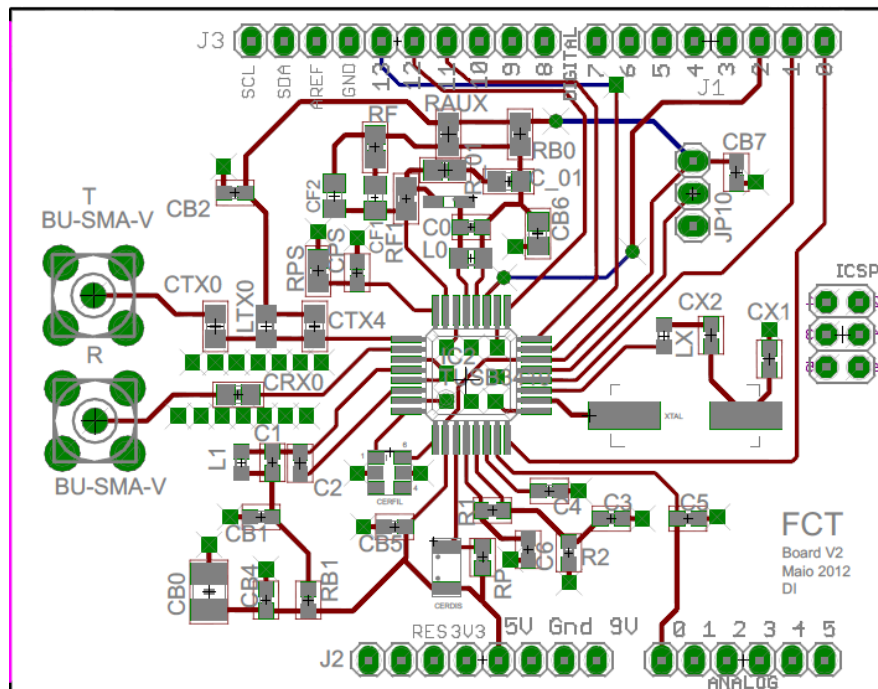


Figura 3.17- *Layout* completo da placa (Eagle).

A Figura 3.18, apresenta uma vista em 3D da placa protótipo de testes, obtida com o software Google SketchUp 8.

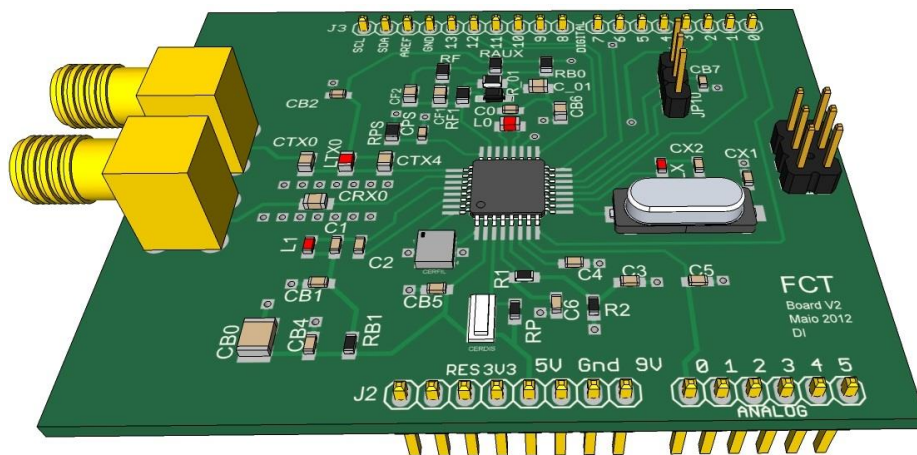


Figura 3.18- Pré-visualização da placa utilizando o programa Google SketchUp 8.

3.3.3. Ensaio Experimental do Protótipo

Após a implementação da placa, pormenorizada nas secções anteriores, fabricação, solda dos devidos componentes, obteve-se os seguintes resultados práticos na utilização da placa de teste em modo de transmissão para as frequências de 40 MHz e 434 MHz, como se pode visualizar respectivamente pelas Figura 3.19 e Figura 3.20.

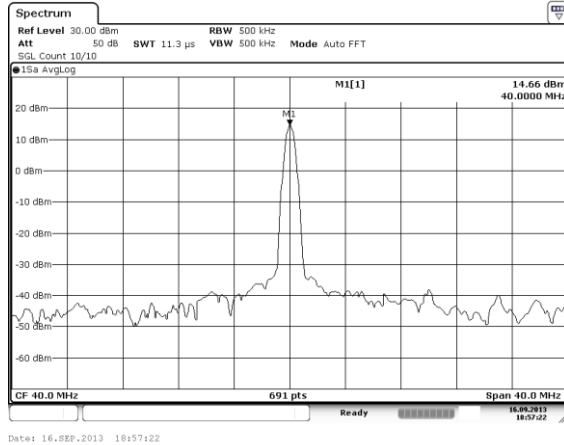


Figura 3.19- Modo transmissão 40 MHz.

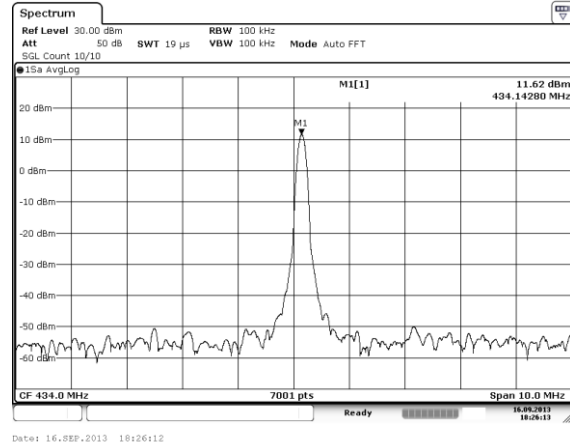


Figura 3.20- Modo transmissão 434 MHz.

Como se pode observar pelas figuras anteriores o transmissor apresenta uma potência de emissão de 14,66 e de 11,62 dBm respectivamente para 40 MHz e 434 MHz. A imprecisão da frequência de transmissão é de 1% para a frequência de 434 MHz, e deve-se à imprecisão dos componentes utilizados.

Com base dos parâmetros S ,

$$\begin{aligned} S_{11} &= 0,8278 - j * 0,3347 \\ S_{12} &= 8,33 * 10^{-4} + j * 3.32 * 10^{-3} \\ S_{21} &= -0,2958 + j * 0,2550 \\ S_{22} &= 0,9734 - j * 0,2146 \end{aligned}$$

que são disponibilizados na ficha de especificação do transreceptor [17], calculou-se a impedância de entrada e saída do referido componente em modo recepção. Em virtude do módulo do parâmetro S_{12} ser baixo ($|S_{12}| = 0,003$), utilizou-se a aproximação para o caso unilateral, isto é,

$$\rho_{in} = S_{11} \wedge \rho_{out} = S_{22} \quad (\text{Eq.3.6})$$

$$\text{O Coeficiente de reflexão é dado pela fórmula: } \rho = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (\text{Eq.3.7})$$

$$\text{Manipulando a Eq.3.7, em termos de } Z, Z = \frac{(\rho + 1)Z_0}{1 - \rho} \quad (\text{Eq.3.8})$$

Substituindo os valores dos parâmetros S na equação anterior e considerando $Z_0 = 50 \Omega$,

$$Z_{in} = 71,56 - j * 236,26 \Omega$$

Pelo resultado anterior pode-se concluir que Z_{in} é composta por uma componente resistiva (71,56) e por uma componentes reactiva ($-j * 236,26$), correspondendo esta última a uma capacidade equivalente de $Z_{cin} = \frac{1}{j\omega C_{in}} \Rightarrow C_{in} = 1,56 \text{ pF}$.

De salientar que para calcular os valores da impedância à entrada e à saída, foram utilizados os parâmetros S, com frequência igual a 433 MHz (valor próximo à frequência de teste 434 MHz) e no modo de recepção com ganho baixo. Portanto, utilizando-se o mesmo raciocínio anterior, obteve-se os seguintes resultados à entrada (anteriormente calculado) e à saída:

- Impedância à entrada: $R_{in} = 71,56 \Omega$ e $C_{in} = 1,56 \text{ pF}$
- Impedância à saída: $R_{out} = 6,88 \Omega$ e $C_{out} = 0,80 \text{ pF}$

De salientar que os valores das impedâncias calculados anteriormente são valores aproximados, pois utilizou-se o caso unilateral. Como o valor do $|S_{12}| \neq 0$, tem-se de utilizar a abordagem bilateral. Mas como, esta abordagem possui uma condição para ser utilizada ($K > 1$) e esta não foi satisfeita, com $K = 0,80$, sendo K dado pela seguinte equação [29]:

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|} \text{ e } \Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$$

Pelos valores anteriormente calculados, pode-se concluir que existe uma atenuação do sinal, necessitando de inserir uma malha de adaptação para mitigar esse efeito, maximizando a potência de transmissão.

4. Gestão Energética

Este capítulo dedica-se ao estudo e análise do nível e distribuição do consumo energético associado ao nó sensor e actuador (NSA).

4.1. Fornecimento Energético

Conforme mencionado anteriormente, este é um aspecto preponderante no funcionamento do NSA. Este tipo de equipamento dispõe, normalmente, de módulos de captura de energia ambiente, tornando-o auto-suficiente em termos energéticos.

4.1.1. Armazenamento de Energia

Uma bateria permite armazenar e fornecer energia eléctrica ao NSA, podendo esta ser recarregável ou não, [30]. A Tabela 4.1 apresenta as principais características das baterias recarregáveis mais comuns.

Tabela 4.1- Características Baterias Secundárias (a partir de [31]).

| Parâmetros | | Bateria recarregável | | | |
|-----------------------------|-------------------|----------------------|-------|-------|---------------|
| | | Ácido de Chumbo | Ni-Cd | Ni-MH | Liquid Li-Ion |
| Tensão Nominal (V/célula) | | 2 | 1,2 | 1,2 | 3,7 |
| Densidade Energética | por Peso (Wh/kg) | 35 | 50 | 80 | 125 |
| | por Volume (Wh/l) | 80 | 150 | 200 | 320 |
| Nível Tolerância Sobrecarga | | Alto | Médio | Baixo | Não tolera |
| Auto-descarga (%/mês) | | ≈0 | 25-30 | 30-35 | 6-9 |
| Ciclo de vida | | 300 | 500 | 500 | 800 |
| Efeito Memória | | Não | Sim | ≈Não | Não |
| Toxicidade | | Alta | Alta | Baixa | Baixa |
| Custo de Produção | | Muito baixo | Baixo | Médio | Alto |

Para além das características salientadas na tabela acima, é possível observar que a resistência interna das baterias de ácido de chumbo (agregado de 12 V), Ni-Cd (6 V) e Ni-MH (6 V) é menor do que 100 mΩ, entre 100-200 mΩ e entre 200-300 mΩ, respectivamente.

Para se proceder à escolha da melhor bateria para uma determinada aplicação, consideram-se as seguintes especificações [32],[33]:

- **Efeito memória**, parâmetro inicialmente definido para a bateria Ni-Cd e que traduz o facto destas “memorizarem” a quantidade de energia descarregada, só aceitando carga nessa mesma proporção;
- **Capacidade**, este parâmetro define a quantidade de energia que a bateria pode fornecer, expressa em ampere-hora;

- **Corrente de descarga**, corrente máxima que a bateria pode fornecer, em Coulomb (C);
- **Auto-descarga**, como o próprio nome indica, é a quantidade de carga que a bateria perde.

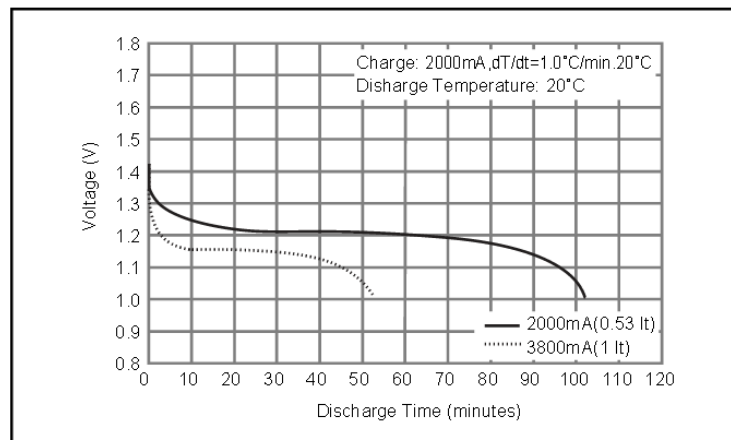


Figura 4.1- Descarga típica de uma bateria (a partir de [34]).

Na Figura 4.1 está representado uma descarga típica de uma bateria Ni-MH, com tensão nominal de 1,2 V e capacidade média de 3,8 Ah. A duração da descarga da bateria depende fortemente do valor da taxa de descarga e da capacidade da bateria, não apresentando uma relação directa entre esses parâmetros. Neste caso, o tempo de descarga estimado para uma corrente de 3,8 A é superior ao que é efectivamente obtido, sendo este efeito mais acentuado com o envelhecimento do material.

4.1.2. Fonte de Energia

Conforme já mencionado anteriormente, a integração de módulos de captura de energia do meio ambiente em conjugação com baterias recarregáveis permite estender a autonomia energética do NSA. As abordagens mais usais para implementação deste tipo de micro-geradores de energia são, [10]:

- **célula fotovoltaica**, converte energia da luz do sol em energia eléctrica, sendo esta fortemente dependente das condições meteorológicas e da intensidade da luz solar;
- **gradientes de temperatura** [35], abordagem que utiliza a diferença de temperatura para a converter em energia eléctrica. Um dos fenómenos utilizados nos geradores termoeléctricos é o efeito *Seebeck*. O princípio é utilizar uma diferença de temperatura entre duas extremidades, sendo estas condutoras, desencadeando a movimentação dos electrões da extremidade mais quente para a mais fria (propriedades físicas dos condutores metálicos);
- **vibração mecânica**, que pode ser convertida em energia eléctrica através de materiais piezoeléctricos.

Das abordagens salientadas anteriormente o painel fotovoltaico é a forma que melhor se adapta ao caso em estudo, para além de apresentar uma melhor densidade de potência, conforme é registado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2- Comparação Geradores de Energia (a partir de [10]).

| Fonte de Energia | | Densidade de potência |
|---|--------------------------|--------------------------------------|
| Solar (Exterior) | dia solarengo | 15 mW /cm ² |
| | dia nublado | 0,15 mW /cm ² |
| Solar (Interior) | mesa escritório padrão | 0,006 mW /cm ² |
| | lâmpada escritório <60 W | 0,57 mW /cm ² |
| Gradiente de temperatura ($\Delta t = 5$ K) | | 80 μ W /cm ² |
| Vibração (depende da amplitude e da frequência) | | 0,1 - 10000 μ W /cm ³ |

O painel fotovoltaico é constituído por células solares cujo substrato é o silício. Ao incidir luz solar, é desencadeado um fluxo de electrões cuja a intensidade é proporcional à densidade de fotões incidentes. O modelo eléctrico ilustrado na Figura 4.2 representa o comportamento equivalente da célula fotovoltaica.

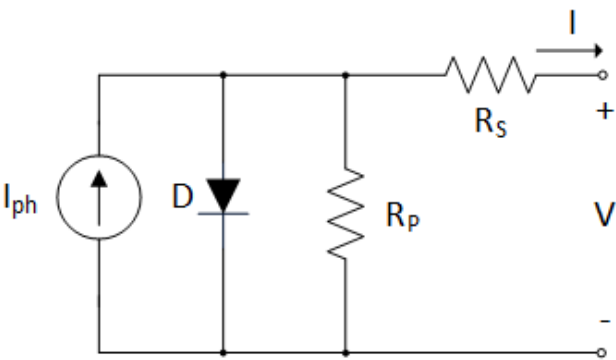


Figura 4.2- Modelo eléctrico de uma célula fotovoltaica.

Como se pode observar pela Figura 4.2, uma célula fotovoltaica comporta-se como uma fonte de corrente em paralelo com um díodo, incluindo as perdas de carácter resistivo, R_s , e as perdas R_p devido a imperfeições na junção (originando uma corrente de fuga).

A característica corrente-tensão (IV) de uma célula fotovoltaica está representada na Figura 4.3 (curva a vermelho), destacando-se também a evolução da potência (assinalada a azul). Este gráfico permite identificar três parâmetros que caracterizam o desempenho da célula:

- Corrente de curto-circuito (ICC), corresponde à corrente máxima da célula;
- Tensão de Circuito Aberto (VCA), corresponde à tensão máxima da célula sem carga (circuito aberto);
- Ponto de Potência Máxima (PPM), corresponde ao ponto ideal onde a célula fornece a máxima potência à carga. Ponto de Potência Máxima (PPM), corresponde ao ponto ideal onde a célula fornece a máxima potência à carga.

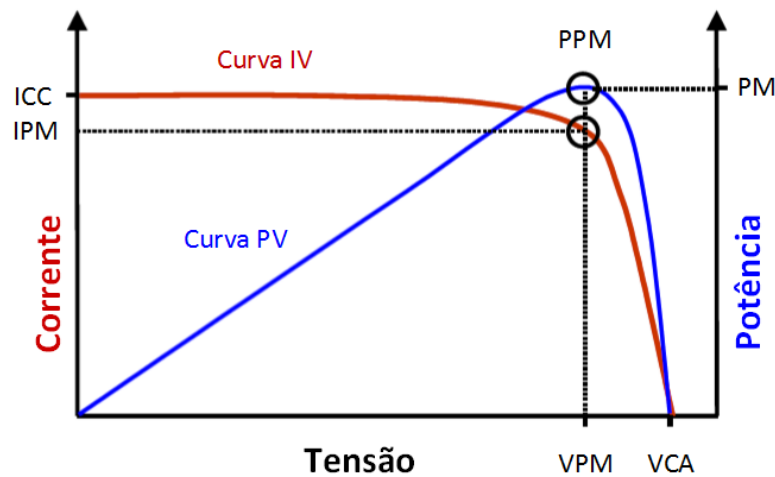


Figura 4.3- Curva característica de uma célula (a partir de [36] e alterado).

De salientar que a característica IV da célula é afectada pelas alterações da intensidade de radiação solar e/ou variações da temperatura. Estas variações têm impacto na corrente fornecida pela célula (directamente proporcional à densidade de fotões) e na tensão (em particular para as variações de temperatura), [37].

4.1.3. Conversor DC-DC

A célula fotovoltaica comporta-se como uma fonte DC cujo valor depende da intensidade da radiação e o valor da sua tensão nominal é determinado pela configuração do agregado de células elementares. A compatibilização entre esta tensão e a tensão de alimentação do circuito é garantida através da utilização de uma etapa de conversão DC-DC. Dependendo da aplicação, o conversor DC-DC permite reduzir a tensão da fonte de entrada ou, alternativamente, poderá ser utilizado para aumentar o nível desta tensão. Para cada um dos casos existe uma topologia específica, designadas por *Buck* e *Boost* consoante se pretende reduzir ou aumentar a tensão, respectivamente.

Por último a estabilização da tensão de alimentação é obtida com recurso a um circuito regulador.

4.2. Técnicas Avançadas para Redução do Consumo Energético

4.2.1. Controlo da Potência de Transmissão

O consumo energético do módulo de comunicação rádio representa uma larga fatia do consumo total do NSA, justificando a importância de um controlo de potência eficaz.

O controlo da potência de transmissão está implicitamente relacionado com o distanciamento físico entre o emissor e o receptor, com a geográfica da área de cobertura, da densidade da rede e da QdS.

Ao nível da topologia da rede, a comunicação em regime de retransmissão *Multi-hop* (referido na secção 2.5.1) permite reduzir a distância média entre equipamentos, diminuindo a energia de transmissão necessária por cada salto. A optimização do controlo da potência, neste contexto, pode ser obtida através de uma estratégia traduzida pelo *Local Minimum Spanning Tree* (LMST) [6]. Essa técnica baseia-se essencialmente em três fases: recolha de informações, construção da topologia e determinação da potência de transmissão de cada ligação. Numa primeira fase, todos os NSA disponibilizam informação específica sobre identificação e posicionamento através do envio de mensagens transmitidas à potência máxima. Com base nos níveis de RSSI recebidos é possível traçar um mapeamento do posicionamento dos NSA existentes na vizinhança. A determinação desta distribuição permite construir uma imagem da topologia de rede.

A terceira fase corresponde à determinação do nível da potência de transmissão, para que o Nó possa comunicar eficientemente com todos os NSA vizinhos. De facto, ao obter a indicação do nível de potência recebido, P_r , e sabendo que a mensagem foi enviada com o nível máximo de potência, P_{max} , o NSA pode estimar as perdas de percurso (*Path Loss* - PL), através da equação $PL = \frac{P_r}{P_{max}}$. Com base neste valor, o NSA pode ajustar dinamicamente a potência de emissão para um nível mais eficiente.

4.2.2. Controlo de Actividade

O controlo de actividade pode ser dividido em duas vertentes. A primeira é otimizar a eficiência energética ao nível da operação cíclica do módulo de rádio. A segunda vertente está centrada em encontrar e corrigir actividades ineficientes que aumentam o consumo energético, seja de um Nó ou de toda a rede.

Uma solução utilizada para a primeira vertente é diminuir o ciclo de trabalho activo (*duty cycle*), diminuindo consequentemente o consumo médio da unidade de comunicação. A unidade de comunicação dispõe de quatro modos de operação, nomeadamente o modo de transmissão, recepção, *idle* e *sleep*, sendo que o primeiro modo consome mais energia. Neste contexto, a optimização do consumo deste módulo passa pela selecção eficiente de cada modo de operação. Uma

abordagem utilizada é designada por recepção cíclica [10], representada na Figura 4.4. Nesta configuração, a unidade de RF encontra-se preferencialmente no modo *sleep*, despertando periodicamente para verificar se tem dados a receber, durante o período de escuta (*listen period*). Após este período, o Nó regressa ao modo preferencial. Optimizações adicionais podem ser aplicadas ao nível da sincronização entre os tempos de comunicação entre os Nós, como por exemplo, permitir que o Nó Receptor envie pequenas mensagens indicando o período de escuta (*listen period*). O período que envolve o tempo em escuta (*listen period*) e período de *sleep* é designado por *wakeup period*, sendo o *duty cycle* definido pela relação entre estes dois parâmetros. Refira-se que um valor pequeno de *duty cycle* contribui para aumentar a autonomia do NSA.

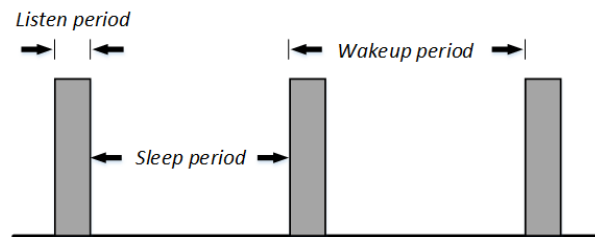


Figura 4.4- Modelo *duty cycle*.

A diminuição do nível de potência associada à transmissão permite diminuir o consumo energético mas também poderá ter impacto na qualidade da ligação, em consequência da degradação da SNR. Esta degradação da SNR poderá ser combatida através de mecanismos avançados de controlo de erros, designadamente o *Automatic Repeat Request* (ARQ). Este último, tem como funcionalidade verificar se houve ou não erros nos dados recebidos. A utilização do ARQ implica a adição de bits de controlo adicionais, a indicação do Nó de origem e de um valor (*checksum*) gerado por um mecanismo para detectar erros, por exemplo o *Cyclic Redundancy Check* (CRC) [6]. Ao receber um pacote de dados, o receptor utiliza um algoritmo para calcular o *checksum*. Caso esse valor seja igual ao inserido no pacote recebido, envia uma resposta positiva (*positive acknowledgment*), caso contrário envia uma resposta negativa (*negative acknowledgment*).

Dynamic Power Management (DPM) é uma estratégia que se insere na segunda vertente. Tem como objectivo minimizar dinamicamente o consumo de energia, consoante a tarefa que se pretende executar, solicitando apenas a quantidade de energia necessária, colocando os componentes num estado energeticamente mais baixo, sendo que esta estratégia pode ser qualificada por uma das seguintes abordagens, [8]:

- *dynamic operation modes*;
- *dynamic scaling*.

A primeira abordagem consiste no desenvolvimento de uma lista de modos de configuração, no qual cada modo possui diferentes combinações de estados, dependentemente dos vários

componentes existentes no Nó, conforme mostrado na Tabela 4.3. De salientar que cada configuração é caracterizada por um determinado nível de energia e que cada configuração é ajustada a priori consoante o conhecimento das tarefas que serão realizadas.

Tabela 4.3- Modos de Configuração.

| Configuração | Processador | Modo Comunicação |
|--------------|-------------|------------------|
| P0 | Activo | Transmissão |
| P1 | Activo | Recepção |
| P2 | Activo | Standby |
| P3 | Idle | Standby |
| P4 | Sleep | Standby |

Para finalizar, tem-se de que ter noção que a troca entre diferentes modos de configuração requer um custo extra de consumo energético, bem com um tempo de transição associado.

A segunda abordagem é complementar à primeira, sendo dividida em *Dynamic Voltage Scaling* (DVS) e *Dynamic Frequency Scaling* (DFS). Está associado à unidade de processamento, otimizando a sua performance, quando está no modo activo. A maioria das tarefas agendadas não requerem a máxima performance e são concluídas antes do tempo previsto, o que consequentemente coloca o processador num estado inoperacional, como se pode visualizar na Figura 4.5. Nesse estado o processador continua a utilizar a frequência máxima de processamento, e com uma tensão de alimentação excessiva, havendo desperdício de recursos.

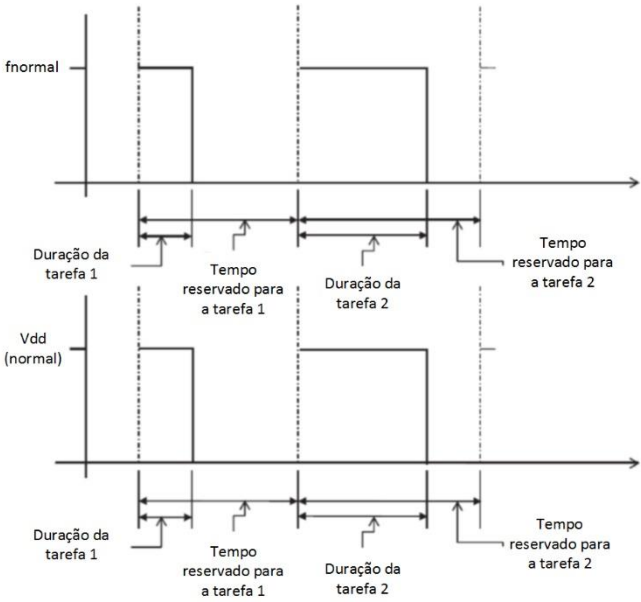


Figura 4.5- Máxima performance do processador (a partir de [8] e alterado).

Portando, para minimizar os desperdícios assinalados anteriormente, os parâmetros (frequência de processamento e tensão de alimentação) podem ser adaptados dinamicamente consoante as tarefas a serem executadas, como se pode verificar na figura abaixo.

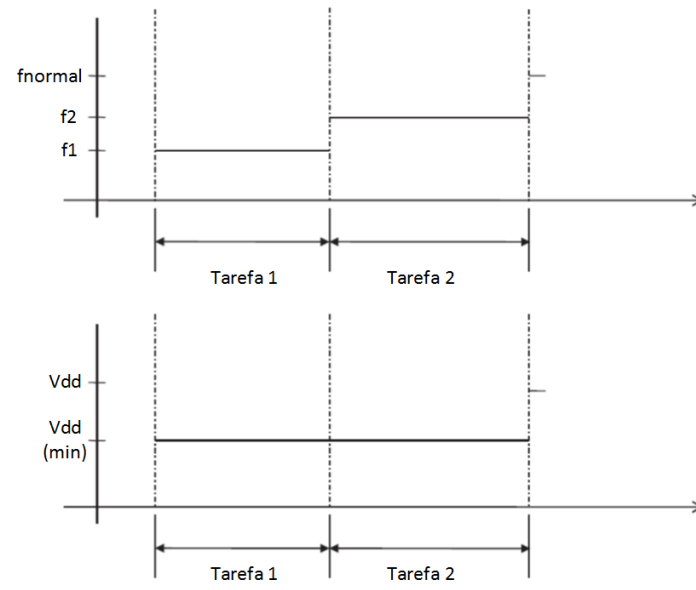


Figura 4.6- Otimização dos parâmetros (a partir de [8] e alterado).

4.3. Caracterização do Consumo Energético do Primeiro Protótipo de Teste

Partindo-se dos resultados do ensaio experimental do primeiro protótipo, descrito no capítulo anterior, enumeram-se algumas observações de natureza energética.

A placa de teste dispõe das tensões de alimentação de 5 V e 3,3 V. Esta última, é obtida através de um regulador inserido na plataforma Arduino, LP2985-33DBVR. Apresenta-se na Tabela 4.4 as principais características energéticas da plataforma Arduino.

Tabela 4.4- Características energéticas.

| Versão Arduino | Uno R3 |
|--------------------------------------|----------------|
| Microcontrolador | ATmega328P |
| Tensão de Funcionamento | 5 V |
| Chip USB-TTL | ATmega16U2 |
| Corrente máx. via USB | 500 mA |
| Regulador 5V | NCP1117ST50T3G |
| Tensão Entrada recom. (regulador) | 7-12 V |
| Limite de Tensão Entrada (regulador) | 6-20 V |
| Corrente máx. via Regulador | Superior a 1 A |
| Regulador 3,3 V | LP2985-33DBVR |
| Corrente DC pino 3,3 V | 150 mA |
| Corrente DC pino E/S | 40 mA |

Enumeram-se, de seguida, as principais conclusões retiradas do ensaio experimental:

1. Como o objectivo é possuir um vasto conjunto de sensores/actuadores distribuídos numa determinada área, o consumo energético é um requisito de extrema importância. Assim, para utilizar a configuração Arduino + módulo de comunicação, a forma mais fácil de alimentação é através de uma bateria de 9 V ou através de uma bateria com uma tensão de alimentação suportada pelo regulador de tensão, com gama de tensão recomendada de 7 a 12 V. No entanto, esta última impõe dificuldades adicionais ao dimensionamento da unidade de energia, atendendo às dimensões que as baterias apresentam para essas tensões;
2. Perante as várias versões do Arduino (Duemilanove e Uno) disponíveis, verificou-se experimentalmente que, para o mesmo programa (*sketch*), estas apresentam diferentes consumos energéticos, como se pode observar na Tabela 4.5 (valores retirados ao final de 1 minuto). Essa diferença de consumos (superior a 20 mA) é explicada pela constituição das diferentes versões da plataforma. Na realidade a principal diferença reside no integrado que estabelece a ligação entre o microcontrolador (MCU, ATmega328P) e o

interface USB. A placa Duemilanove dispõe do integrado FT232RL, enquanto a última versão Uno (R3), possui o MCU ATmega16u2. Refira-se que este último não é simplesmente um conversor série para USB mas pode ser utilizado como um dispositivo USB autónomo, podendo actuar como um rato ou teclado, *disk drive*, *MIDI*, [38] [39].

Tabela 4.5- Consumo energético de diferentes versões do Arduino.

| Programa | Versão Arduino | | | | |
|-------------------------|----------------|---------|---------|---------|--|
| | Duemilanove | | Uno R3 | | |
| <i>Sketch</i> em branco | 33,8 mA | | 58,1 mA | | |
| Blink 3s (LED On/Off) | 37,6 mA | 34,5 mA | 59,8 mA | 56,7 mA | |

Conclui-se que a configuração Arduino + módulo de comunicações não possui o grau de eficiência energética desejada para NSA remotos, dados os requisitos ao nível da bateria e do consumo energético excessivo de alguns componentes não necessários para esse contexto.

Estas considerações justificam a elaboração de uma nova abordagem desenvolvida no próximo capítulo.

5. Projecto do NSA e Teste do Sistema Final

5.1. Arquitectura do NSA e Blocos Constituintes

Com base nos resultados apresentados anteriormente, é proposta uma arquitectura (Figura 5.1) suficientemente flexível que permita ao NSA incluir diversos módulos de comunicação rádio, incluindo o transreceptor TH7122, testado anteriormente. A componente de comunicação incluiu também um módulo de comunicação via infravermelhos.

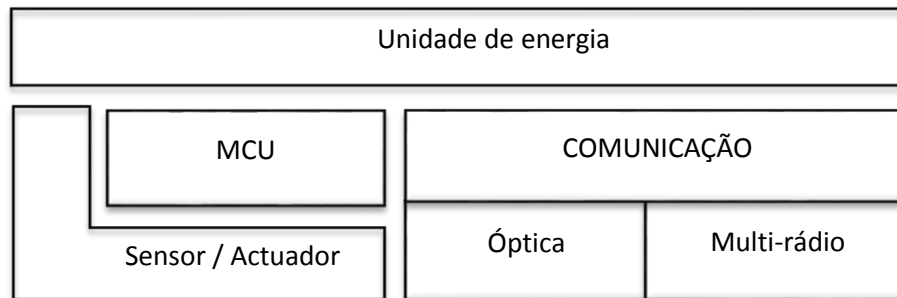


Figura 5.1- Arquitectura proposta.

Para além da componente comunicações, e pelas razões já expressas anteriormente, o NSA inclui um módulo de armazenamento de energia e de regulação da tensão de alimentação de todo o circuito.

Tendo sido seleccionada a arquitectura, foram seleccionados os principais componentes para cada um destes módulos.

5.1.1. Microcontrolador – MCU

Na unidade de processamento a escolha baseou-se no MCU que seja da mesma família utilizada na plataforma Arduino, Atmel AVR 8-bit, permitindo assim reutilizar parte da programação desenvolvida anteriormente. Fazendo uma breve pesquisa, existem no mercado os modelos Atmega8, Atmega168 e Atmega328 [40], que possuem respectivamente 8, 16 e 32 kBytes de memória. A escolha recaiu sobre o modelo Atmega328-PU. As principais razões que levaram à escolha do MCU Atmega328-PU em vez do Atmega328P-PU, foi por este ser mais barato e por possuir um endereço de assinatura diferente ao usado no Arduino, promovendo assim, uma maior flexibilidade em termos de mecanismo para gravação em memória.

5.1.2. Unidade de Comunicação

Nesta secção, expõe-se brevemente os módulos utilizados para complementar o referido transreceptor (capítulo 3), permitindo utilizar um maior diversidade de soluções (frequências, tipos de modulações) para a comunicação.

Definiu-se para o transreceptor TH7122 uma frequência de comunicação 434 MHz, devido ao nível máximo de potência deste coincidir com o nível máximo permitido por lei [19].

Depois de definir a frequência do transreceptor, escolheu-se os seguintes módulos de comunicação (mencionadas a seguir), devido às suas características e à facilidade de implementação controlo por software que possuem, existindo bibliotecas (conjuntos de funções) que podem ser utilizadas no MCU escolhido.

Escolheu-se o módulo RFM22B para a banda ISM de 868 MHz, na qual possui as seguintes características principais, Tabela 5.1 [41].

Tabela 5.1- Características principais RFM22B.

| Características: | | RFM22B |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Frequência (MHz) | | 868 |
| Gama da tensão de alimentação (V) | | 1,8 - 3,6 |
| Potência máxima de trans. (dBm) | | 20 |
| Consumo Energético (mA) | Trans. (20 dBm) | 85 |
| | Recepção | 18,5 |
| Gama taxa de trans. (kbps) | | 0,123 - 256 |
| Modulações | | OOK, FSK e GFSK |
| Sensibilidade (a 2 kbps GFSK) (dBm) | | -121 |
| Interface SPI | | Sim |

Em virtude da grande popularidade da Internet e da forte infra-estrutura existente em torno das redes locais sem fios, utiliza-se o módulo RN-171-XV para aceder a estas (redes) e assim utilizar todo o seu potencial. O módulo em questão (RN-171-XV) apresenta as seguintes características principais, Tabela 5.2 [42]:

Tabela 5.2- Características principais RN-XV.

| Características: | | RN-XV |
|-----------------------------------|-------------------|---|
| Frequência (GHz) | | 2,4 |
| Gama da tensão de alimentação (V) | | 3,0 - 3,7 |
| Padrão | | 802.11 b/g |
| Gama potência de trans. (dBm) | | 0 - 12 |
| Consumo Energético a 12 dBm (mA) | 802,11b (2 Mbps) | 190 |
| | 802,11g (24 Mbps) | 240 |
| | Recepção | 40 |
| Interface TTL UART | | Sim |
| Taxa de trans. máx UART (kbps) | | 460 |
| Aplicações de Rede | | DHCP, DNS, ARP, ICMP, UDP, Telnet, FTP client e HTML client |

Para além das várias formas de comunicação RF salientadas, inseriu-se no equipamento outra forma de comunicação, sendo esta de natureza óptica. Podendo assim ser usado em aplicações imunes a interferências electromagnéticas. Utiliza-se o dispositivo Infravermelho, GP2W0004XP0F, composto pela parte de emissão e recepção, com características registadas na Tabela 5.3, [43].

Tabela 5.3- Características principais do módulo Infravermelho.

| Características: | | <i>I_r</i> |
|--|--|----------------------|
| Gama da tensão de alimentação (V) | | 0 - 6 |
| Gama da tensão de alimentação do LED (V) | | 0 - 7 |
| Taxa de trans. (kbps) | | 9,6 - 115,2 |
| Ângulo de visão min., θ_{min} (°) | | 15 |
| Distância trans., $\theta \leq 15^\circ$ (m) | | 1 |
| Intensidade min. de radiação (mW/sr) | $\theta \leq 15^\circ$, Tensão de operação 3,3 V e <i>duty cycle</i> ≈ 19 % | 40 |

5.1.3. Unidade Energética

Uma vez que o sistema a implementar possui um gerador de energia (e.g. painel solar), este tem de possuir uma forma de armazenamento suportado numa bateria recarregável de baixo custo.

Recorrendo às características dos vários modelos de baterias da Tabela 4.1, optou-se pela escolha da bateria do tipo Ni-MH para a aplicação em estudo. Em virtude de apresentar valores satisfatórios relativamente aos parâmetros de densidade energética, proporcionando baterias com uma maior capacidade energética (Ah) quando comparadas com as baterias do tipo Ácido de Chumbo e Ni-Cd. Adicionalmente esta apresenta um menor grau de poluição ambiental e possui também uma maior imunidade ao efeito de memória comparativamente à bateria Ni-Cd.

Relativamente à bateria lítio, a Ni-MH apresenta valores menores em termos da densidade energética, mas tem como vantagem ter um nível de tolerância superior a sobrecargas, sendo que a bateria do tipo lítio não suporta tal efeito, no qual iriam requerer um circuito mais complexos para controlar a carga da bateria.

Para a escolha da forma de alimentação da placa em estudo, teve-se como principal referência um projecto da Cooking Hacks, designado por *Solar Module for Arduino* [44]. Esse projecto tem várias formas de alimentação: superior a 6 V, inferior a 6 V e via USB. De referir que as formas de alimentação antes de alimentar a bateria do tipo lítio (3,7 V), recorre a um carregador (MAX1555) para carregar a bateria, fornecendo tipicamente 280 mA. Pode ser alimentado de duas formas, via USB e por uma tensão de entrada inferior a 7 V, de salientar que a forma de alimentação superior a 6 V passa primeiro por um regulador de tensão antes de ser ligada ao referido carregador.

Em seguida, possui um conversor DC-DC (MAX1674) que converte a tensão de entrada para uma tensão de saída de 5 V. Utiliza como fonte de entrada, um painel solar de 3 W e uma bateria de lítio de 2,3 Ah [44].

Utilizou-se somente o conversor DC-DC, devido a este apresentar características muito interessantes, fornece uma tensão de alimentação de 5 V, com uma tensão de entrada na gama dos 0,7 V até V_{OUT} (5 V), tensão de *start-up* 1,1 V, rendimento superior a 90% e consegue fornecer uma corrente máxima perto dos 500 mA (com uma tensão de entrada de 3,6 V e uma tensão de saída de 5 V), possui um detector de bateria fraca, sendo que esta característica pode fornecer um precioso contributo à abordagem em estudo, podendo por exemplo diminuir o consumo energético consoante a indicação do baixo nível da bateria evitando a descarga total da bateria, o que levaria ao módulo a ficar inoperacional [45].

Para além da forma de alimentação de 5 V, a abordagem em estudo tem de ser capaz de fornecer uma tensão 3,3 V, para alimentar os módulos de comunicação salientado na secção anterior.

Para tal tarefa, não basta apenas fazer um simples divisor de tensão, mas tem-se de ter um circuito mais complexo. De notar que a tensão da bateria não possui um valor fixo (Figura 4.1), esta pode variar na ordem dos 20% da sua tensão nominal.

Teve-se como base de referência o conversor referido anteriormente (MAX1674), que para além de fornecer uma tensão de saída de 5 V também pode fornecer uma tensão de 3,3 V. Bem como o próprio regulador (LP2985-33DBVR) do Arduino Uno R3.

A primeira referência (MAX1674) não pode ser utilizada, devido a este ser um conversor DC-DC *Step-Up*, ou seja, só se poderia aplicar caso a tensão de entrada no componente fosse sempre inferior à tensão de saída, o que não acontece.

A segunda referência (LP2985-33DBVR) apresenta características interessantes, mas não pode ser utilizado, pois este possui uma corrente de saída típica nos 150 mA, o que para o caso não é suficiente.

Tendo como principal base o regulador de baixa queda de tensão salientado anterior, escolheu-se o modelo TPS77533, devido a este possuir uma tensão de saída fixa nos 3,3 V, uma gama de tensão de entrada dos 2,7 até aos 10 V e uma baixa queda de tensão para uma corrente de saída de 500 mA, que varia do valor característico de 169 mV até um valor máxima de 287 mV. De salientar que escolheu-se um encapsulamento de potência, que permite uma taxa de dissipação (*dissipation ratings*) de 2,35 W para uma temperatura ambiente inferior a 25 °C [46]. Esse parâmetro (*dissipation ratings*) é a potência máxima suportada pelo componente.

5.2. Desenvolvimento e Implementação do Hardware

5.2.1. Esquemático Eléctrico

Questão Energética

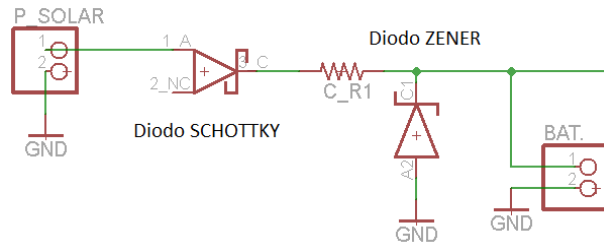


Figura 5.2- Controlador Painel-Bateria.

Como se pode visualizar na Figura 5.2, pretende-se ligar um painel solar fotovoltaico a uma bateria. Podia-se conectar directamente o painel solar à bateria, pois o painel é uma fonte de corrente e não uma fonte de tensão. Mas essa junção iria proporcionar efeitos indesejados, como por exemplo, a corrente fluir no sentido inverso ao desejado.

O circuito da figura anterior tem como função controlar a carga da bateria. Utilizou-se o díodo Schottky com dois objectivos. O primeiro é para não existir corrente a fluir no sentido contrário. O segundo é, em conjunto com a resistência causar uma queda de tensão à saída do painel solar, com a finalidade de fornecer à bateria a máxima energia possível. Essa quantidade de energia desejada encontra-se em evidência nas curvas características do painel solar (corrente / tensão), sendo o ponto que fornece a máxima energia possível, designado por PPM (Figura 4.3). Esse ponto é cerca de 80 % da tensão em aberto. De salientar que como é evidente, este controlador apresenta muitos problemas, não existindo um acompanhamento relacionado com as alterações de iluminação. Necessitava de um conversor DC-DC com uma tensão de saída variável e independentemente da tensão da bateria. Para o caso em estudo, não se justificaria, só para casos de grande potência (superior a 200 W) [47].

Um assunto muito importante nos controladores de carga é proteger a baterias contra sobrecargas. Mais uma vez, salienta-se a simplicidade do circuito em questão, no qual podia-se utilizar um controlador de carga mais complexo. Mas como o sistema é de baixa potência, a bateria utilizada não é do tipo lítio, sendo essa muito sensível à sobrecarga e como a corrente fornecida pelo painel é muito inferior à capacidade da bateria. Utilizando-se para tal função um díodo Zener. Caso a tensão imposta pela bateria seja maior que a tensão de Zener, este começa a conduzir corrente, com a finalidade de descarregar a bateria, até esta ter uma tensão menor a tensão de Zener. Escolheu-se um díodo Zener com uma tensão de Zener sensivelmente igual à tensão onde existe a ocorrência de sobrecarga (aproximadamente 20% superior à tensão nominal).

Referente ao fornecimento energético dos componentes, este é dividido em duas tensões de alimentação 3,3 e 5 V.

Para o caso da alimentação de 5 V, recorre-se a dois métodos:

- Alimentação externa 5 V;
- Utilização do conversor (MAX1674) para converter a tensão de entrada da bateria (3,6 V) para a tensão pretendida (5 V).

Para seleccionar um dos dois métodos de alimentação de 5 V, utilizou-se um conector (*pinhead* 1X3), como se pode observar pela Figura 5.3. Caso se pretenda seleccionar a alimentação externa de 5 V, introduz-se um *jumper* entre o primeiro e o segundo pino do conector. Caso contrário coloca-se o conector entre o segundo e o terceiro pino.

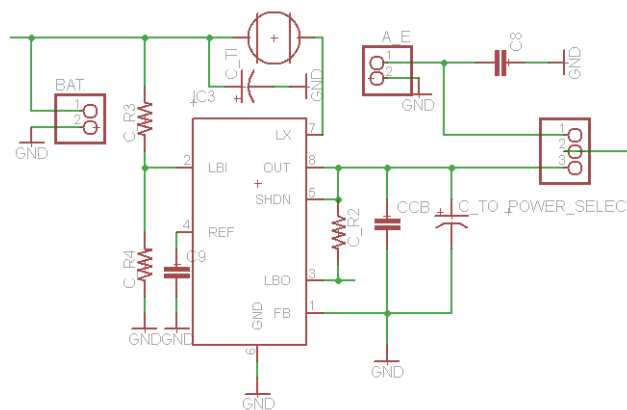


Figura 5.3- Seleccionar a forma de alimentação 5 V.

Para o caso da alimentação 3,3 V, utilizou-se o regulador de baixa queda de tensão TPS77533, a jusante da bateria.

Para o caso dos componentes de comunicação, excluindo o transreceptor estudado no capítulo 3, recorreu-se a conectores (*pinheads*) para facilitar a inserção/remoção dos componentes de comunicação, dando um carácter opcional na sua utilização.

De salientar que os módulos de comunicação RF (RFM22B e RN-XV), apresentam um encapsulamento compatível com os conectores. O que não acontece com o dispositivo infravermelho, que teve-se que realizar um *breakout* (placa de adaptação), utilizando um processo de fresagem. Após realização do esquemático e *layout* do circuito, pode-se ver o resultado final na Figura 5.4. Introduziu-se a moeda para realçar a pequena dimensão do dispositivo.

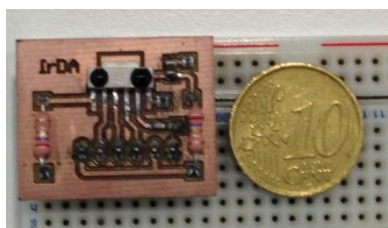


Figura 5.4- Breakout Infravermelho.

Pelo conjunto das Figura 5.5 e Figura 5.6, visualiza-se o resultado final do esquemático realizado no programa Eagle, de notar que o módulo de comunicação TH7122 continua basicamente o mesmo, existindo uma pequena correcção comparativamente à figura 3.19. Removeu-se a resistência “RAUX” que possuí-a a mesma função que a resistência “RB0”. A Figura 5.5 está visível o esquemático pertencente à unidade de processamento (ATmega328) e da unidade de comunicação (TH7122). Relativamente à Figura 5.6 está representados o restante esquemático da placa.

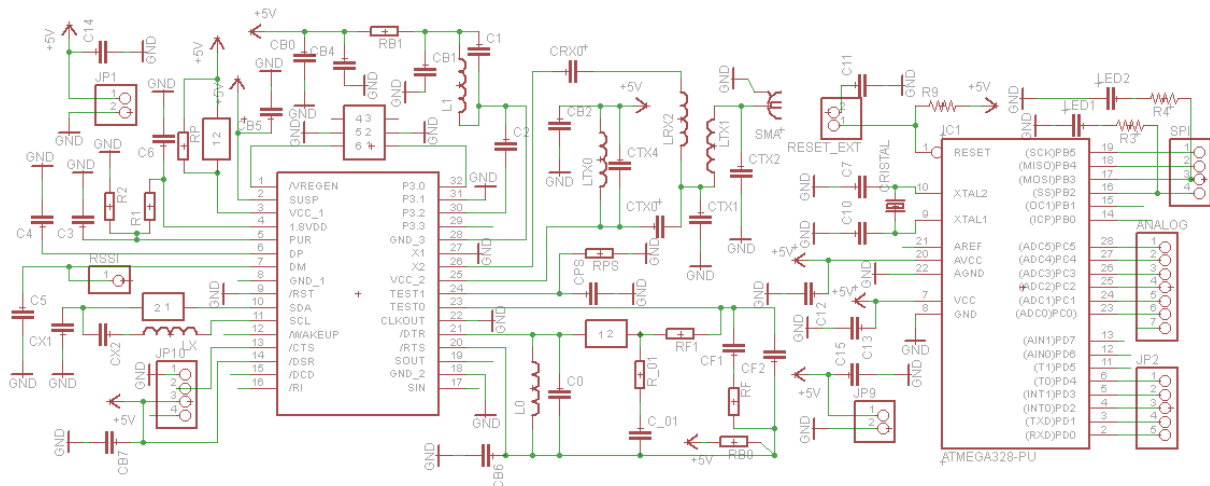


Figura 5.5- Esquemático completo da Placa – Parte 1.

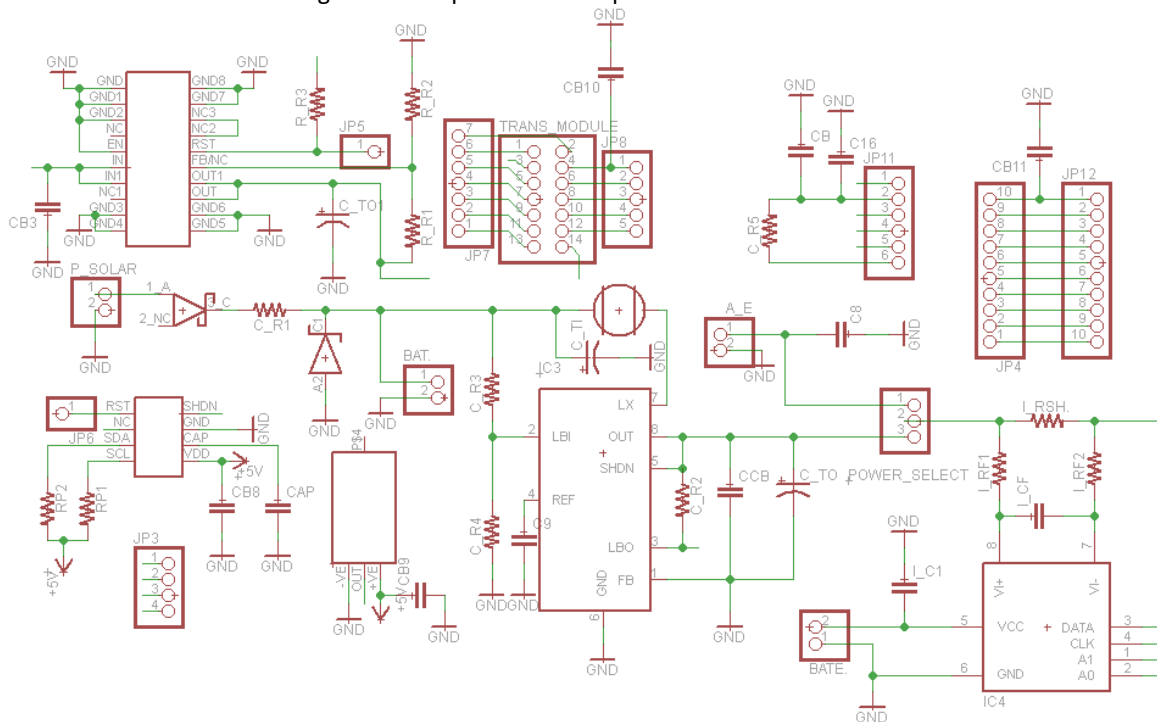


Figura 5.6- Esquemático completo da Placa – Parte 2.

5.2.2. Implementação em Circuito Impresso

Após a elaboração do esquemático da placa realizou-se o seu desenho para circuito impresso. A implementação desta placa teve como princípio a implementação da placa de comunicação da secção 3.3.2, obtendo-se o resultado representado na Figura 5.7.

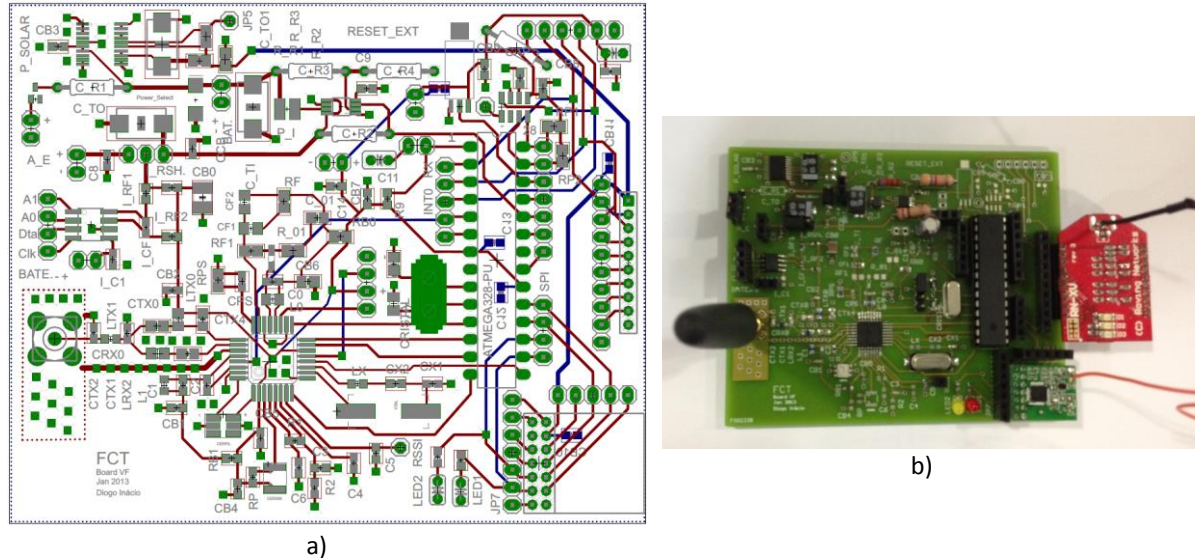


Figura 5.7- a) Layout da Placa; b) protótipo completo.

Para melhorar o nível de EMI referente ao sinal RF, utilizou-se uma barreira de vias (para o plano massa) e também um pequeno plano de massa na camada superior, alocado na periferia do conector *SubMiniature version A* (SMA), conectando-o ao plano de massa principal através de múltiplas vias, diminuindo assim as interferências causadas pela radiação que se propagada através do dieléctrico do PCB.

Introduziu-se dois *Light Emitting Diode* (LED) com a finalidade de auxiliar na depuração (*debug*) da aplicação e inseriu-se uma malha de adaptação *narrow-band* rede PI (*PI network*).

Dispôs-se os módulos de comunicação na parte direita da placa, de referir que o módulo RN-XV (representado ao lado do MCU), não assenta totalmente na placa. Faltando uma fila de conectores em paralelo aos já existentes. Realizou-se essa operação devido à não obrigatoriedade desses pinos. Ao realizar essa operação reduziu-se a área da placa, o que diminuiu consequentemente o seu custo. A dimensão final da placa é de 92,50 por 75,35 mm.

5.2.3. Teste Individual da Placa

Com o intuito de proceder à elaboração de uma rede de sensores e actuadores sem fios, realizou-se um teste individual do protótipo referido nas secções anteriores. Dado a natureza da placa dividiu-se o ensaio em duas partes, designadamente a componente energética e a parte de comunicação.

Na **componente energética**, o enfoque incidiu no ensaio do circuito que garante o fornecimento de energia ao circuito principal.

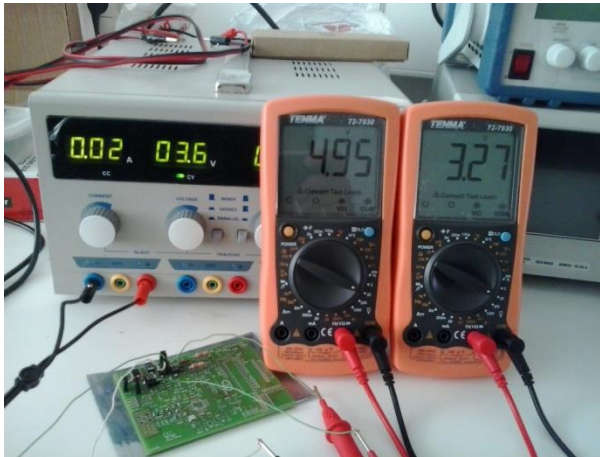


Figura 5.8- Teste da componente energética.



Figura 5.9- Teste da componente energética com influência do diodo Zener.

As experiências foram elaboradas, utilizando uma fonte de alimentação e dois multímetros em modo de voltímetro. Recorreu-se à fonte de alimentação para fornecer uma tensão característica da bateria, constituída por três células em série ($3 \times 1,2 \text{ V} = 3,6 \text{ V}$). De salientar que os multímetros apresentam aproximadamente os valores desejados (5 V e 3,3 V). De realçar que, quando maior a tensão de entrada maior é a corrente fornecida à placa, como se pode visualizar pela comparação das Figura 5.8 e Figura 5.9. Este efeito deve-se especialmente à tensão de alimentação (4,4 V) ser superior à tensão de Zener, provocando consequentemente a condução da corrente eléctrica. Caso o fornecimento energético fosse através de uma bateria iria provocar a sua descarga, colocando a tensão máxima da bateria num patamar seguro. Método simples com o intuito de controlar a carga da bateria, evitando sobrecargas.

Na **parte de comunicação** dividiu-se o teste em duas partes: emissão e recepção, tendo-se recorrido a analisador espectral com 7GHz de banda.

Programou-se a placa para o modo de transmissão para uma frequência de 434 MHz, obtendo-se o resultado representado na Figura 5.10.

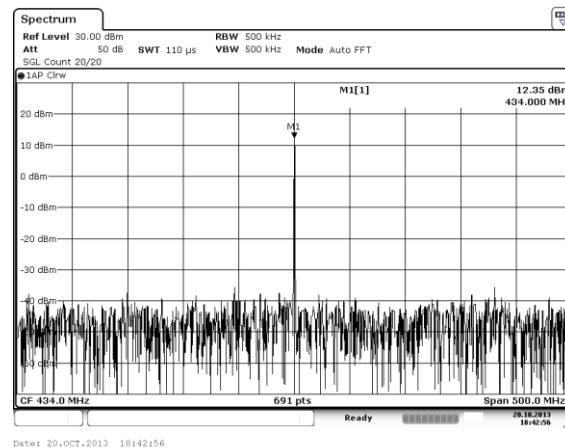


Figura 5.10- Modo transmissão.

Como se pode observar na Figura 5.10, o sinal de comunicação possui uma risca espectral à frequência pretendida (434 MHz) e uma potência de transmissão de 12,35 dBm.

Na parte de recepção não se obteve os melhores resultados, devido à carência de uma ponta adequada (a ser utilizada no aparelho indicado). Realizou-se uma ponta, recorrendo a um conector SMA e dois fios, uma para a massa e outro para o sinal RF, sendo que esse mecanismo funciona como uma antena.

Apresentado apenas uma imagem (de entre várias possíveis). Escolheu-se uma imagem do sinal recebido à entrada do IFA após ser filtrado, demonstrado pela Figura 5.11.

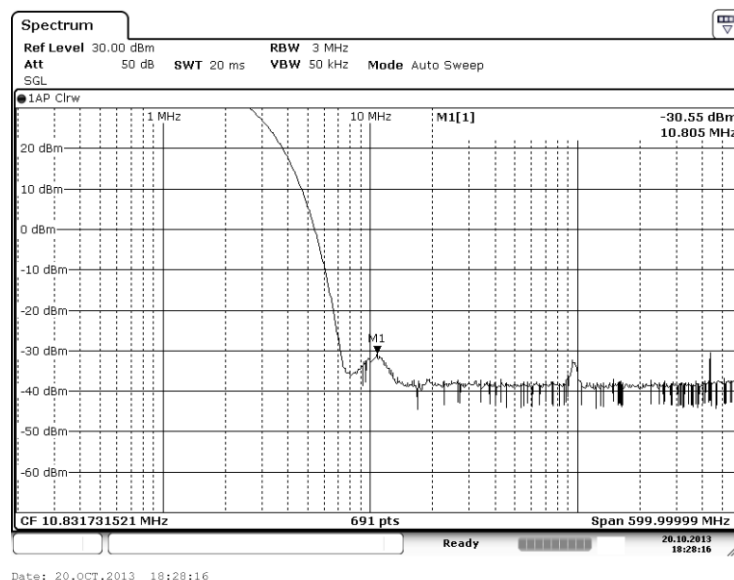


Figura 5.11- Sinal à entrada do IFA.

Como se pode observar pela figura anterior, o sinal recebido está misturado para uma frequência intermédia aproximadamente de 10,7 MHz. Pode-se também visualizar as frequências de rádio (100 MHz) e da frequência associado ao transmissor (434 MHz). De salientar que a imagem apresenta uma escala logarítmica.

Para proporcionar uma comunicação o mais eficiente possível, realizou-se a seguinte experiência, com a finalidade de sintonizar o transmissor e o receptor. Colocou-se a placa elaborada no capítulo 3, placa de teste, em modo transmissão, transmitindo constantemente um sinal (modulação ASK) à frequência de 434 MHz. Do outro lado da experiência, colocou-se a placa em estudo no modo recepção. Controlando o transreceptor, realizou-se um varrimento espectral entre as frequências 424 e 454 MHz com um intervalo de 0,1 MHz, registrando os valores do RSSI, como se pode observar pela Figura 5.12. Devido à proximidade das placas, configurou-se o ganho do LNA da placa de recepção para o valor baixo.

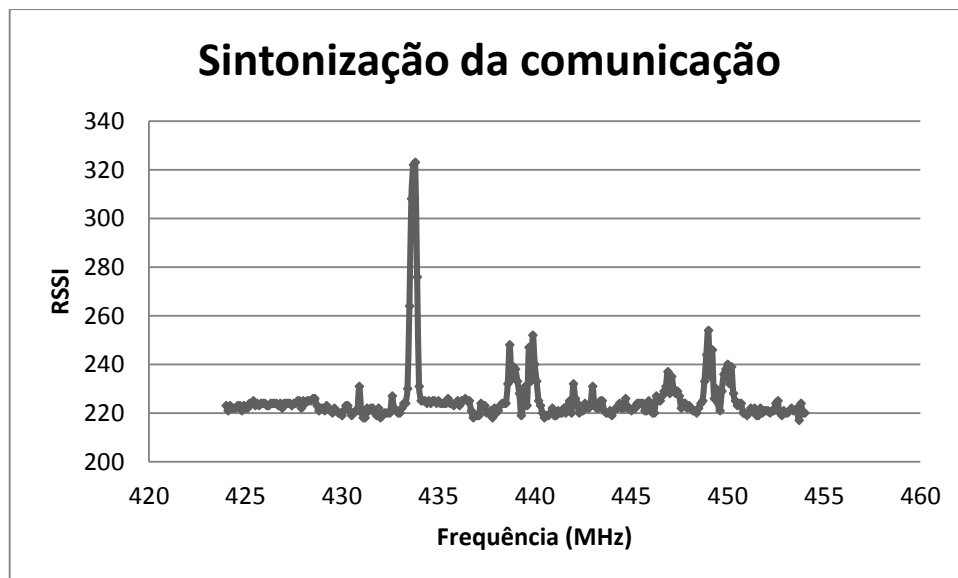


Figura 5.12- Evolução do RSSI.

Conclui-se pela observação da Figura 5.12 que para uma frequência de transmissão de 434 MHz, tem-se que sintonizar o receptor para uma frequência de 433,8 MHz. Estando associado a esse ponto um valor de RSSI de 323. O RSSI fornece a indicação do nível do sinal recebido pelo transreceptor. Como esse sinal é analógico e o MCU possui um ADC de 10 bits e a sua tensão de operação é de 5 V, pode-se calcular o seu valor em tensão, cujo resultado é de 1,58 V. A variação da frequência óptima de comunicação do transmissor e do receptor deve-se à imprecisão dos componentes utilizados.

Recorrendo ao manual do transreceptor [26] e com o valor calculado anteriormente (1,58 V) o sinal recebido possui uma potência superior a -50 dBm.

5.3. Desenvolvimento do Software de Controlo

Tanto o controlo desta placa e da placa realizada no capítulo 3, possuem muitos aspectos em comum, nomeadamente o controlo do transreceptor TH7122. De salientar que ambas as placas utilizam a mesmo MCU (Atmega328). Apresenta-se em anexo todo o código desenvolvido para o efeito.

Antes de se proceder à gestão dos vários módulos existentes, destaca-se as várias ligações existentes, representadas nas Tabela 5.4 e Tabela 5.5.

Tabela 5.4- Ligação da placa de teste.

| Arduíno | TH7122 | |
|-----------|----------|--------|
| Nº Socket | Nome | Número |
| 0 | IN_DTA | 12 |
| 1 | OUT_DTA | 8 |
| 2 | FS1/LD | 19 |
| 3 | | |
| 4 | | |
| 5 | | |
| 6 | | |
| 7 | | |
| 8 | | |
| 9 | | |
| 10 | | |
| 11 | TE/SDTA | 16 |
| 12 | FS0/SDEN | 17 |
| 13 | RE/SCLK | 15 |
| A0 | RSSI | 7 |
| A1 | | |
| A2 | | |
| A3 | | |
| A4 | | |
| A5 | | |

A Tabela 5.4 apresenta todas as ligações possíveis entre a placa Arduino e o módulo de comunicação. De assinalar que os pinos 11, 12 e 13 são os pinos pertencentes ao *Serial Control Interface* (SCI). O pino 0 e 1 correspondem respectivamente aos dados que vão ser transmitidos e recebidos pelo transreceptor. O pino 2 e o pino 0 analógico correspondem respectivamente ao sinal do *Lock Detector* e ao nível do sinal recebido (RSSI). E as restantes células que não possuem correspondência (em branco) podem ser utilizadas livremente pelo programador.

Tabela 5.5- Ligações da placa principal.

| Atmega328 | | Arduino | TH7122 | | Outras ligações | |
|-----------|--------|-----------|----------|--------|---------------------------------|---------------------------|
| Nome | Número | Nº Socket | Nome | Número | | |
| Reset | 1 | | | | | |
| RX | 2 | 0 | | | Comunicação Série RN-XV e Ir | |
| TX | 3 | 1 | | | | |
| INT0 | 4 | 2 | | | SD Ir | |
| INT1 | 5 | 3 | GAIN_LNA | 29 | | |
| PD4 | 6 | 4 | | | | |
| VCC | 7 | | | | | |
| GND | 8 | | | | | |
| XTAL1 | 9 | | | | | |
| XTAL2 | 10 | | | | | |
| PD5 | 11 | 5 | FS0/SDEN | 17 | | |
| PD6 | 12 | 6 | TE/SDTA | 16 | | |
| PD7 | 13 | 7 | RE/SCLK | 15 | | |
| PB0 | 14 | 8 | OUT_DTA | 8 | | |
| PB1 | 15 | 9 | IN_DTA | 12 | | |
| SS | 16 | 10 | | | LED1 | Comunicação SPI RFM22B |
| MOSI | 17 | 11 | | | LED2 | |
| MISO | 18 | 12 | | | | |
| SCK | 19 | 13 | | | | |
| AVCC | 20 | | | | | |
| AREF | 21 | | | | | |
| GND | 22 | | | | | |
| ADC0 | 23 | A0 | | | | |
| ADC1 | 24 | A1 | | | VLBO | |
| ADC2 | 25 | A2 | | | | |
| ADC3 | 26 | A3 | | | | |
| ADC4/SDA | 27 | A4 | | | | |
| ADC5/SCL | 28 | A5 | | | | |

Como se observa na Tabela 5.5, apresenta mais ligações em comparação com a Tabela 5.4, em virtude do incremento do número de componentes utilizados. Possui duas colunas para o MCU com a indicação do nome e respectivo número, que estão associados ao número do *socket* do Arduino. Sendo que este permite simplificar o código da programação, bastando colocar o número do *socket* em vez do endereço do porto.

Comparativamente à placa de teste, a placa em estudo apresenta diferentes ligações. Isto deve-se aos pinos entre 10 e 13 possuírem a função de comunicação *Serial Peripheral Interface* (SPI), que é usada pelo módulo RFM22B. E os pinos 0 e 1 têm a função de comunicação série (UART-TTL), que é

usada nos módulos RN-XV e infravermelho. Em virtude da complexidade de ligações existentes na placa optou-se por não realizar algumas ligações existentes na placa de teste. Nomeadamente aos sinais FS1/LD e RSSI, sendo que estas podem ser realizadas através de ligação externa, caso sejam necessárias.

De salientar que a placa está habilitada a controlar o ganho do LNA do TH7122 (pino 3), detectar bateria fraca (VLBO relacionado com o controlador DC-DC) pino A1. E desligar o módulo de infravermelho (SD Ir) pino 2.

5.3.1. Controlo da Unidade de Processamento

O controlo do MCU recorre a diferentes métodos, que variam de placa para placa. Devido à utilização de diferentes topologias de comunicação, como já salientado, a placa de teste recorre à comunicação USB, em conjunto com o conversor FTDI para escrever na memória do MCU, o que não acontece para a placa em foco neste capítulo.

Para contornar a ausência da comunicação USB, utilizou-se a placa Arduino como um programador externo, técnica denominada por *In-System Programmer* (ISP). Para que tal seja possível, é necessário controlar os sinais SPI. Constituído pelo sinal Reset, SCK, MOSI, MISO. No qual o Reset deve ser mantido a VCC (5 V) durante a comunicação, o SCK é o sinal de relógio da comunicação e o MOSI e o MISO são os dados transmitidos e recebidos pelo Arduino, respectivamente. Para além dos sinais de controlo também é necessário fornecer uma forma de alimentação, VCC (5 V) e GND (terra). Existindo para tal função um programa realizado, sendo este distribuído com o *Integrated Development Environment* (IDE) do Arduino com o nome de “ArduinoISP” alocado nos exemplos.

Para além de controlar os sinais SPI, é necessário utilizar o AVRDUDE e o AVR-GCC *toolchain*, para gravar em memória do MCU o programa gerado (linguagem máquina).

5.3.2. Controlo da Unidade de Comunicação

Para controlar o transreceptor TH7122, existem dois modos: o *Stand-alone User Mode* (SUM) e o *Programmable User Mode* (PUM).

Quando o transreceptor é inicializado (fornecimento energético), vai para o modo SUM. Este utiliza os pinos FS0/SDEN e FS1/LD para definir uma frequência fixa, utilizando para tal prepósito uma determinada combinação da tensão de alimentação (VCC e GND). No qual as frequências são 315, 433,92, 868,3 e 915 MHz. Para além, de definir a frequência de comunicação, pode-se também alterar o modo de operação (*Standby*, *Receive*, *Transmit* e *Idle*), alternado o valor dos pinos RE/SCLK e TE/SDTA.

O modo salientado anteriormente é um modo muito limitado, que só permite escolher as frequências pré-programadas e possui os restantes valores pré-definidos. O que acontece por exemplo com a potência de transmissão. Sendo muito interessante poder variar a sua amplitude, consoante as diversidades existentes na rede. De salientar que neste modo não existe a possibilidade de utilizar uma frequência de comunicação abaixo dos 300 MHz.

Para contornar essas limitações e poder-se utilizar todo o potencial do transreceptor, existe o modo PUM. Neste modo é utilizado 3 pinos para programação RE/SCLK, TE/SDTA e FS0/SDEN designado por SCL. Para controlar as várias configurações, existe quatro registos de 24 bits cada. Sendo que os 2 bits mais significativos correspondem ao endereço e os restantes (22) bits correspondem aos dados de controlo. De salientar, que cada vez que existe uma alteração de um registo não é necessário programar todos os registos, bastando programar apenas o registo alterado.

Para programar os referidos registos, recorre-se ao IDE do Arduino, respeitando o protocolo de comunicação demonstrado na Figura 5.13. Bem como, as ligações existentes entre o Arduino e o transreceptor. Realizando-se os seguintes procedimentos:

- `init_PUM()` - coloca o transreceptor no modo PUM. Promovendo a variação do estado lógico associado ao pino FS0/SDEN;
- `write_reg(endereco,dado_registo)` - emula o comportamento da Figura 5.13, utilizando o método *Bit Banging*. Enviando de modo iterativo os bit de endereço e os bits de dados, do bit mais significativo para o bit menos significativo.

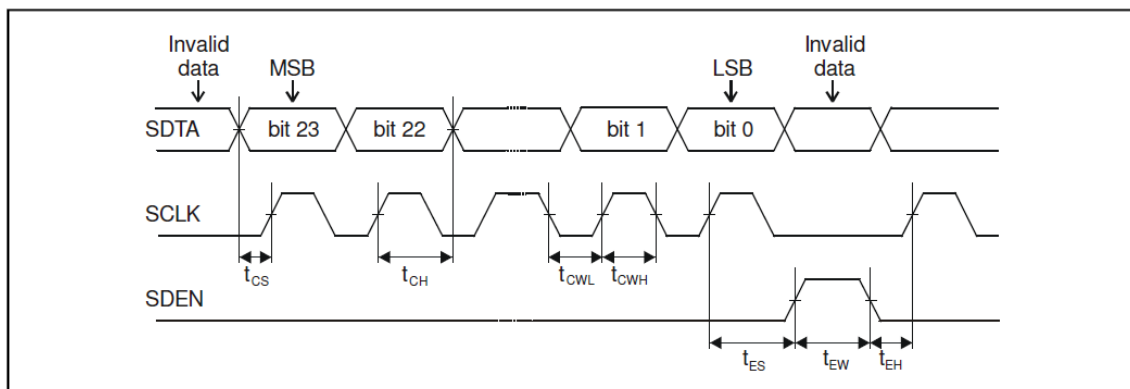


Figura 5.13- Método para programar um registo (a partir de [17]).

5.4. Ensaio Experimental da Aplicação 1

Uma aplicação possível com o intuito de abranger o maior número de dispositivos descritos ao longo deste trabalho, pode ser por exemplo a rede que se observa na Figura 5.14.

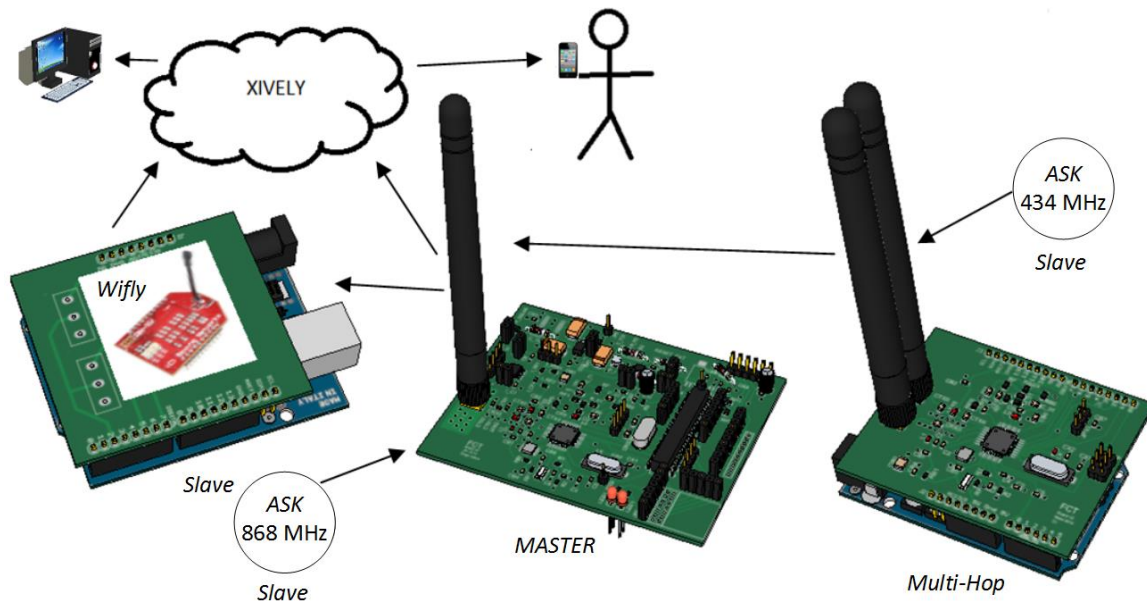


Figura 5.14- Exemplo de uma aplicação.

A rede implementada na Figura 5.14 é composta por 5 componentes. Podendo estes serem divididos nas seguintes categorias:

- *Master* – placa elaborada no actual capítulo.
- *Multi-Hop* – placa de teste da unidade de comunicação (transreceptor TH7122).
- *Slave* – é constituído pelas restantes três placas (“ASK 434 MHz”, “ASK 868 MHz” e “Wifly”), com o intuito de promover à rede um baixo custo de implementação, possuindo menores recursos de hardware em comparação com a placa *Master*.

A rede implementada anteriormente tem como objectivo fazer a monitorização de grandezas físicas, tais como, temperatura, consumo energético e humidade do solo. Estes dados são devidamente processados e enviados para a *Cloud* (Xively).

Em virtude da diversidade da placa *Master*, relativamente à frequência de comunicação, utilizou-se esta mais-valia de modo a melhorar a QdS. Utilizando-se assim o vasto leque de frequências do espectro eletromagnético para diminuir a ocorrência de interferência relativamente à comunicação.

Dado a natureza desta implementação, direccionou-se o estudo relativamente à frequência de comunicação, estando esta dividida para as frequências 434, 868 e 2400 MHz.

5.4.1. Frequência Rádio de 434 MHz

Nesta gama de comunicação a placa denominada por “ASK 434 MHz” realiza o sensoramento da temperatura local, processa essa temperatura e transmite a mensagem processada para a placa “Multi-Hop”.

A placa “ASK 434 MHz” é composta por um transmissor TWS-BS com uma gama de alimentação de 1,5 até 12 V, consumo energético máximo de 8 mA, taxa de transmissão máxima de 8 kbps, potência de saída de 14 dBm e modulação ASK. É composto por um MCU ATtiny85 da mesma família que o utilizado pelo Arduino Uno. Sendo que, este possui uma menor quantidade de pinos (8 pinos na versão PDIP), menor capacidade de memória cerca de 8 e 0,5 kBytes para memória *flash* e SRAM, respectivamente. A forma de alimentação é através de uma pilha de 3V, formato moeda (*coin*).

Após a placa recolher os dados referentes à temperatura local, utilizando o sensor de temperatura DS18S20, cuja comunicação com o MCU é através de um pino digital, via interface 1-Wire. O MCU processa essa informação e envia para a placa “Multi-Hop” a seguinte mensagem:

- “nome do dispositivo”-“grandeza medida”-“valor medido” Exemplo: ID1-T30.00

Para o envio dos dados, processados pelo MCU, utilizou-se a biblioteca VirtualWire. Sendo esta utilizada para modulação ASK. Permite enviar curtas mensagens, não possui mecanismo de retransmissão e de confirmação de mensagens, sendo semelhante ao *User Datagram Protocol* (UDP). Para além, dos dados processados pelo MCU, cujo tamanho máximo é de 27 bytes, o pacote enviado pelo transmissor também inclui uma série de bits para fazer o *training preamble*. Tendo como função fazer o balanceamento do sinal DC. Tem também um símbolo de começo (0xb38) para sincronizar a comunicação, tamanho da mensagem e *checksum*, para verificar a integridade da mensagem [48]. De salientar que esta comunicação, entre a “ASK 434 MHz” e a placa “Multi-Hop” é unidirecional, ou seja, a placa “ASK 434 MHz” só pode transmitir e não pode receber dados.

Para aumentar o alcance da comunicação sem recorrer ao manuseamento das características de comunicação, nomeadamente aumentar a potência de transmissão, diminuir a taxa de transmissão (*data rate*). Inseriu-se a placa “Multi-Hop”, tendo como função retransmitir o sinal entre a placa “ASK 434 MHz” e a placa “Master”.

Para um melhor aproveitamento dos recursos associados à placa “Master”, a placa “Multi-Hop” realiza uma tarefa antes de transmitir a mensagem. Nessa tarefa ocorre o processamento da mensagem recebida. A nova mensagem possui o seguinte formato:

- “nome do transmissor”- “nome da placa *Multi-Hop* ”-“grandeza medida”-“gama medida” Exemplo: ID1-S1-T0

A “gama medida” varia entre o valor 0 até 3. Sendo que 0 - estado inicial, 1 - temperatura negativa, 2 e 3 para temperaturas positivas até e superior a 30 graus, respectivamente.

Com o processamento referido anteriormente, permite à placa “*Master*” poupar recursos, sendo em maior evidência relacionado à unidade de processamento. Em virtude de a placa “*Multi-Hop*”, colocar a informação no formato final, pronta para ser entrega ao utilizador via *Wireless Fidelity (WIFI)*. Para além, de poupar recursos de processamento também vai permitir poupar recursos energéticos (não muito notório para esta aplicação), em virtude da pouca quantidade de dados a enviar.

5.4.2. Frequência Rádio de 868 MHz

Nesta frequência utiliza-se o transreceptor RFM22B anteriormente mencionado (secção 5.2.2). Em virtude do transreceptor TH7122 estar dimensionado para trabalhar na frequência 434 MHz, empregou-se o módulo RFM22B.

Antes de se realizar a montagem desta rede teve-se que fazer a priori um *breakout* para a placa de origem “ASK 868 MHz”. Em virtude deste módulo possuir um espaçamento entre pinos (2 mm) inferior ao utilizado por padrão (2,54 mm), o que dificulta o procedimento de montagem. Para elaborar o *breakout* realizou-se um procedimento semelhante ao realizado para o infravermelho (secção 5.3.1).

Dado a simplicidade desta rede e aos escassos recursos de processamento, especialmente de memória do tipo SRAM, utilizou-se para transmitir os dados recolhidos pelo sensor para a placa “*Master*” a biblioteca RF22. Esta classe é a mais simples de entre as disponíveis, não possui endereçamento e é sem confirmação de mensagens. Existem mais 4 classes implementadas, sendo estas mais complexas, contendo por exemplo confirmação de mensagens e roteamento automático no mecanismo de *multi-hop*. De salientar que as classes mais complexas não podem ser executados no MCU utilizado [49].

A biblioteca utilizada (RF22) é muito semelhante à utilizada na secção anterior, relativamente ao raciocínio da elaboração do pacote. Possui como dimensão máxima 255 bytes para a mensagem de comunicação. E não é compatível com a biblioteca referida na secção anterior (VirtualWire) devido ao formato do pacote. Utilizou-se a modulação ASK (*On-Off Keying* - OOK) para garantir a uniformidade da rede. Sendo que esta pode utilizar também a modulação FSK e GFSK [49].

Relativamente ao processamento e envio/recepção da mensagem é parecido ao descrito na secção anterior.

5.4.3. Frequência Rádio de 2,4 GHz

Para permitir ao consumidor final monitorizar as grandezas recolhidas pelos sensores (placas de origem) e transmitidas/retransmitidas para a placa “*Master*”. Utiliza-se o módulo RN-XV, descrito na secção 5.2.2. Este módulo utiliza o padrão WIFI IEEE 802.11 b/g para auxiliar nessa operação. De entre os vários métodos para apresentar ao consumidor final, escolheu-se enviar dados através do protocolo

de comunicação *HyperText Transfer Protocol* (HTTP) para uma *Cloud* (Xively), como se pode visualizar pela Figura 5.15.

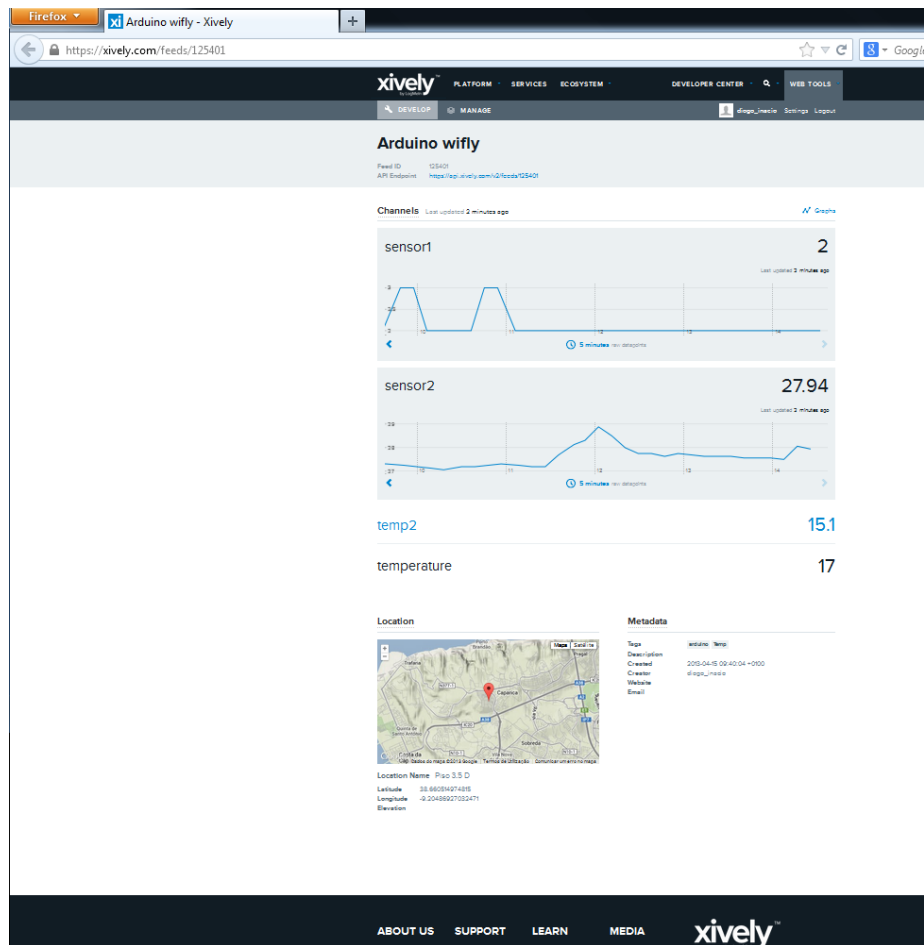


Figura 5.15- Imagem da aplicação em estudo (Xively).

Como se pode observar pela figura anterior, enviou-se dois sinais distintos, inseridos nos canais “sensor1” e “sensor2”. No qual o “sensor1” foi utilizado o método com *multi-hop*, constituído por dois módulos, a unidade “ASK 434 MHz” responsável pelo sensoriamento da temperatura e pela “*Multi-Hop*”, encarregue de receber os dados enviados pela placa anterior (“ASK 434 MHz”), processar esses dados e retransmitir essa informação para a placa “*Master*”. Recorrendo-se à frequência de comunicação 434 MHz.

Para o sinal “sensor2”, utilizou-se a frequência de comunicação 868 MHz, composta unicamente pelas “ASK 868 MHz” e “*Master*”, comunicação directa.

Os sinais apresentados anteriormente foram sujeitos a variações manuais de temperatura. Em virtude dos sensores estarem alocado em diferentes locais, a informação apresentada (Figura 5.15), não se encontra em sintonia.

Para finalizar, falta apenas falar do *shield* realizado, sendo que este, também contém o módulo RN-XV e tem como função fornecer ao utilizador, o consumo energético da placa “*Master*” através do

Xively. De salientar que esse consumo energético é referente aos componentes que possuem uma tensão de alimentação de 5 V.

Para realizar a monitorização do consumo energético, utilizou-se o componente INA219 [50]. Cujo circuito típico é dado pela Figura 5.16.

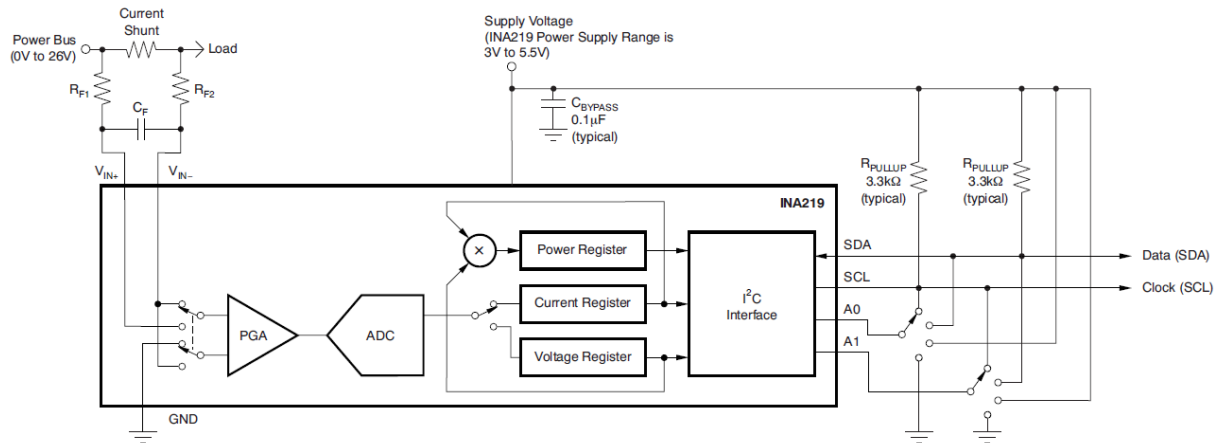


Figura 5.16- Circuito típico (a partir de [50]).

O funcionamento básico do INA219 é através da realização da monitorização da queda de tensão provocada pela *Current Shunt*. Uma característica importante neste componente é a utilização de registos programáveis que proporciona liberdade de configurações. Podendo por exemplo definir o modo de medição (*Trigger/Continuous*) e o número de amostras.

A gama máxima da queda de tensão provocada pela *Current Shunt* é de 320 mV (sendo este também um valor a ser configurados nos registos).

Para além do método da queda de tensão provocado pela resistência, existe também a monitorização da tensão do barramento, denominado por V_{BUS} . Sendo que este é a diferença entre a tensão do terminal V_{IN-} e a terra, não demonstrado na Figura 5.16.

Como se observa na figura anterior possui um circuito de filtragem, constituído pelas componentes " R_{F1} ", " R_{F2} " e " C_F ". É utilizado para comunicação a interface *Inter-Integrated Circuit* (I2C). E o "A0" e o "A1" definem o endereço do INA219.

Com o auxílio do componente INA219 e com a infra-estrutura do Xively, elaborou-se o estudo do consumo energético do conjunto MCU e transreceptor TH7122. Para a realização deste estudo colocou-se o transreceptor em quatro estados diferentes, modo transmissão, recepção, standby e *idle*. E o MCU num estado *sleep*. Executando a seguinte operação de estados em ciclo, modo transmissão com o PA ligado e em seguida desligado, *standby*, recepção, *idle* e por último *sleep*. Podendo-se visualizar a evolução do consumo energético através da Figura 5.17. De salientar que cada estado possui uma duração de 15 segundos, com excepção do estado *sleep*.

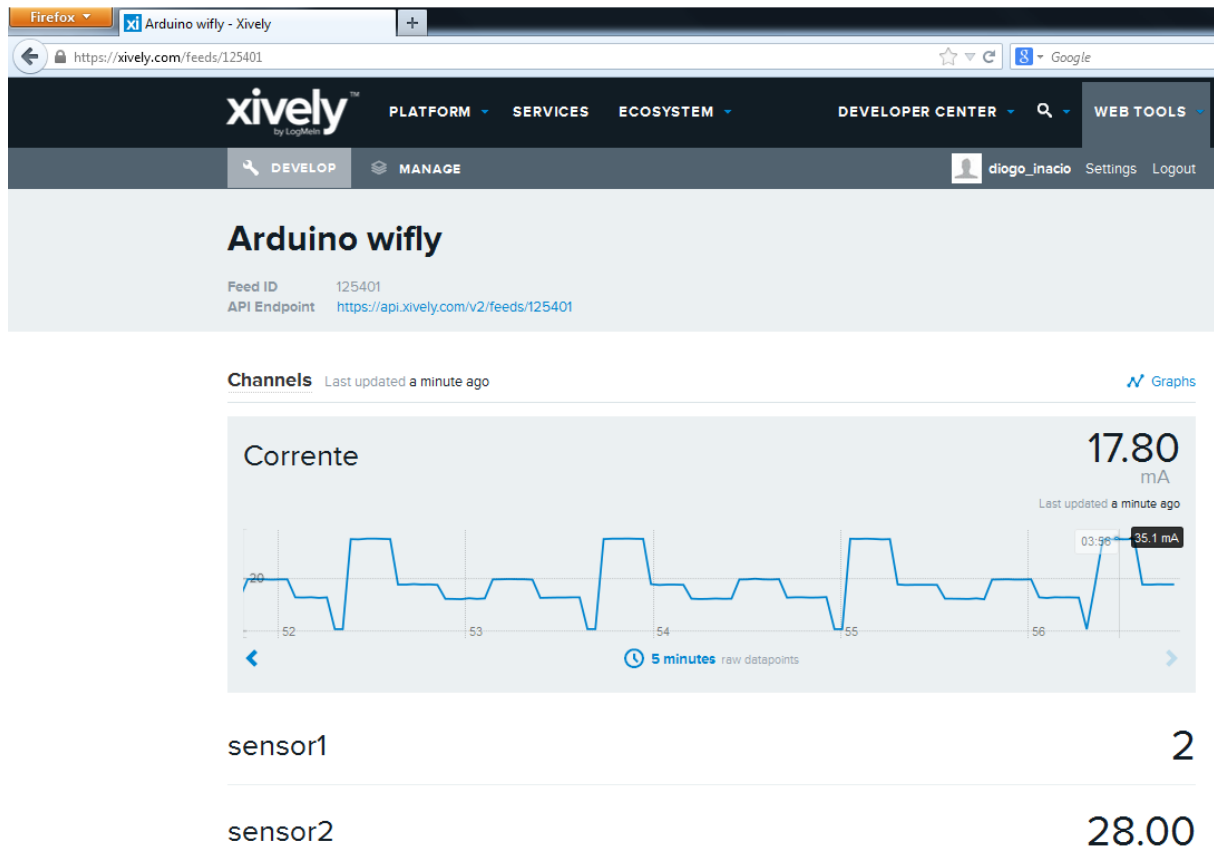


Figura 5.17- Evolução do consumo energético.

Como se pode observar pela Figura 5.17 e pormenorizada nas Figura 5.18 e Figura 5.19, o estado com maior consumo energético é o modo de transmissão com o PA ligado e o estado com menor consumo energético é o modo *sleep*.

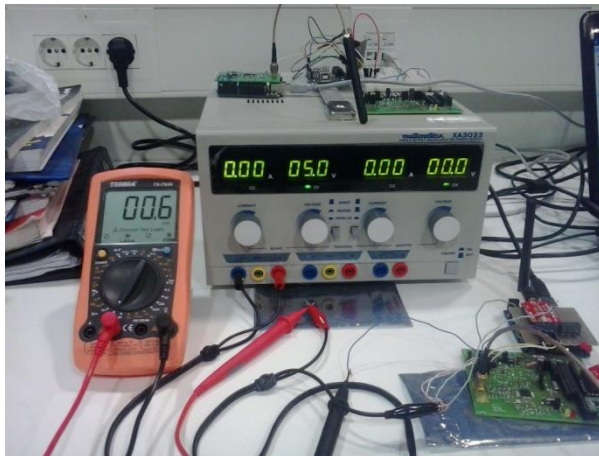
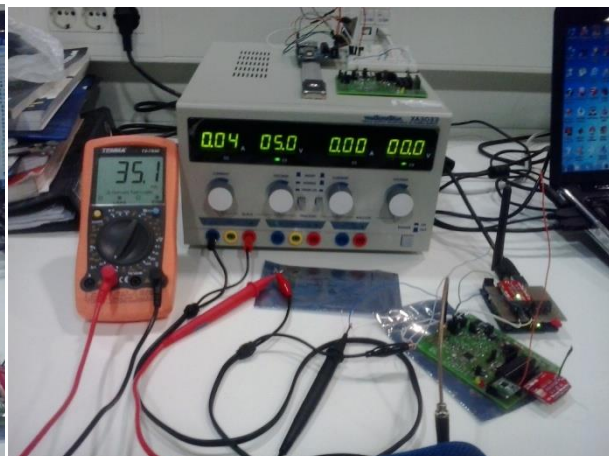

 Figura 5.18- Consumo energético – *sleep*.


Figura 5.19- Consumo energético – transmissão com o PA ligado.

5.4.4. Custo das Placas

Em virtude do custo do projecto ser um parâmetro importantíssimo para a sua aceitação, realizou-se um cálculo superficial sobre as várias placas realizadas, indicando o preço dos diversos componentes associado a quantidades mínimas admissíveis na elaboração deste trabalho. No estudo não está incluído o preço relativamente ao processo de elaboração da placa, solda dos diversos componentes, nem dos custos extras da encomenda, nomeadamente portes de envios.

Dividiu-se o estudo em várias categorias, apresentando apenas o preço final:

Comunicação 434 MHz (transreceptor TH7122): 8,17€

Malha de adaptação do transreceptor: 0,744€

Componente do fornecimento energético elaborado no capítulo 5: 5,78€

Unidade de processamento: 5,041€

Com estes dados pode-se obter facilmente o preço das placas de teste e “Master”, representado nas seguintes tabelas.

Tabela 5.6- Preço da placa de teste.

| Placa Multi-hop | | | | | |
|----------------------|---------------|-----------------|------------|-------------|-------------|
| Componentes | Distribuidora | Código | Quantidade | Preço/unid. | Preço/linha |
| Comunicação 434 MHz | - | - | 1 | 8,169 | 8,169 |
| SMA | Mouser | 571-5-1814832-1 | 2 | 3,08 | 6,16 |
| Antena | RS | 762-0036 | 2 | 6,4 | 12,8 |
| Arduino uno ver3 | inMotion | | 1 | 20 | 20 |
| Barra de pinos de 40 | Mauser | 012-0042 | 2 | 0,22 | 0,44 |
| Total: | | | | | 47,57 |

Tabela 5.7- Preço da placa “Master”.

| Placa Master | | | | | |
|---------------------------|---------------|-----------------|------------|-------------|-------------|
| Componentes | Distribuidora | Código | Quantidade | Preço/unid. | Preço/linha |
| Comunicação 434 MHz | - | - | 1 | 8,169 | 8,169 |
| Malha de adaptação | - | - | 1 | 0,744 | 0,744 |
| Unidade MCU | - | - | 1 | 5,041 | 5,041 |
| Fornecimento energético | - | - | 1 | 5,773 | 5,773 |
| RFM22b | RS | 731-2723 | 1 | 11,15 | 11,15 |
| WIFLY | Mouser | 765-RN-XV-S | 1 | 28,82 | 28,82 |
| SMA | Mouser | 571-5-1814832-1 | 1 | 1,54 | 1,54 |
| Antena | Rs | 762-0036 | 1 | 6,4 | 6,4 |
| Cond. 100 nF | RS | 723-4991 | 7 | 0,203 | 1,421 |
| LED 3mm | Mauser | - | 2 | 0,08 | 0,16 |
| Barra de pinos de 1x40 | Mauser | 012-0042 | 1 | 0,22 | 0,22 |
| Barra de pinos de 1x7 | Mauser | 012-0101 | 1 | 0,17 | 0,17 |
| Barra de pinos 1x10 (2mm) | Mouser | 855-M22-7131042 | 1 | 1,61 | 1,61 |
| Barra de pinos 2x7 (2mm) | Mouser | 855-M22-7140742 | 1 | 1,6 | 1,6 |
| Total: | | | | | 72,82 |

5.5. Ensaio Experimental da Aplicação 2

A aplicação apresentada nesta secção surge no desencadeamento da aplicação referida anteriormente (secção 5.5). Pretendendo-se com esta aplicação fornecer um carácter bidirecional sobre o meio, não realizando apenas a monitoração de grandezas físicas (o que acontece no caso anterior), concedendo também a possibilidade de interagir sobre o meio em questão.

Utilizou-se os diversos dispositivos referidos na aplicação anterior complementando-os com outros dispositivos de modo a elaborar uma rede de sensores e actuadores sem fios, representado na Figura 5.20.

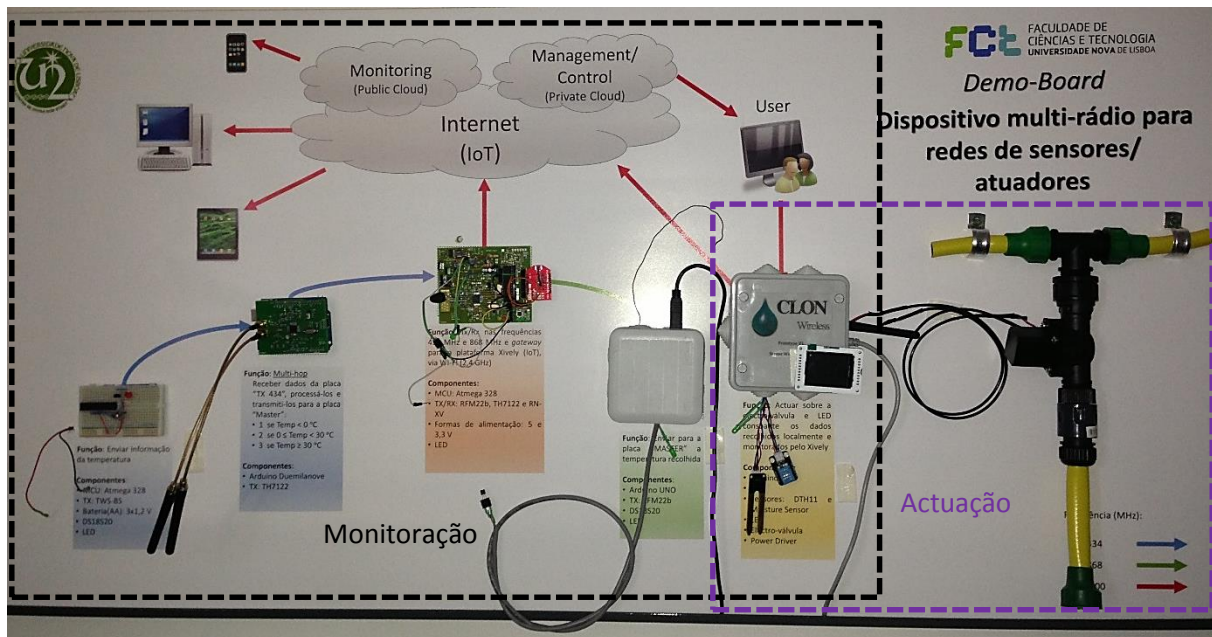


Figura 5.20- Quadro da implementação realizada.

Como se observa na Figura 5.20, o quadro demo realizado é um demonstrador de uma rede de sensores e actuadores sem fios, dividindo-se a sua análise em duas categorias (representados na figura anterior): monitoração e actuação.

Na monitoração o consumidor (utilizador) tem ao seu dispor realizar o acompanhamento da variação de grandezas físicas (temperatura, humidade do solo e do ar) remotamente, visualizando via Internet. Para tal, existe duas formas distintas: através de uma *Cloud* (Xively) (Figura 5.15) e de uma página da Internet (*web page*). Na primeira forma (via *Cloud*) recorre a várias frequências de comunicação, representado na Figura 5.21 e mencionado na secção anterior.

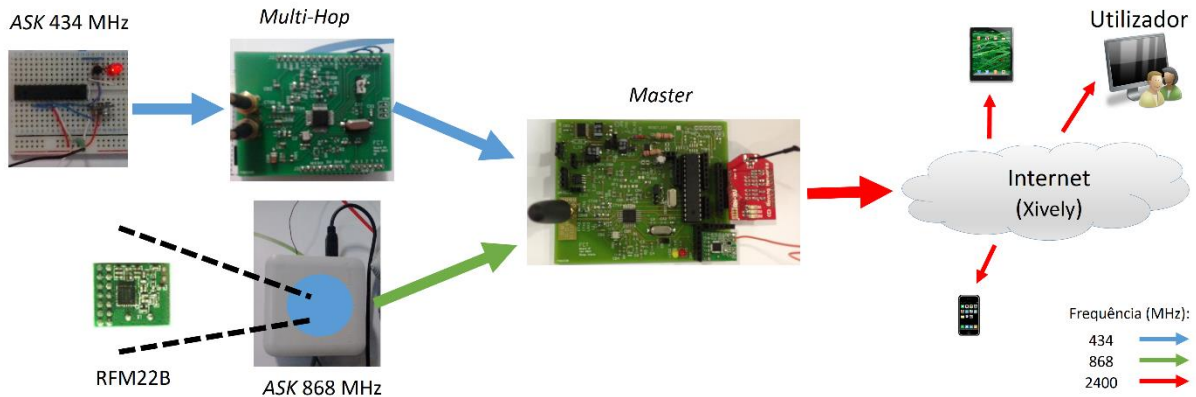


Figura 5.21- Diagrama das diversas frequências de comunicação.

Na Figura 5.21 realiza-se a transmissão dos dados através das bandas ISM, nas frequências 434, 868 e 2400 MHz, ilustrado respectivamente pelas setas a azul, verde e vermelho. A placa “ASK 434 MHz” concretizada por um processo elementar (*breadboard* + componentes) simboliza um dispositivo com poucos recursos, de baixo custo e baixo consumo energético (como se pode visualizar pelas Figura 5.22 e Figura 5.23). É constituído por um MCU Atmega328, um transmissor TWS-BS, sensor de temperatura DS18S20, um LED e a forma de alimentação é por intermédio de três pilhas Ni-MH em série, ou seja, tem uma tensão de alimentação de 3,6 V. De assinalar que o MCU não possui circuito externo (cristal), recorre ao oscilador RC interno para gerar a frequência de relógio, a unidade de comunicação é um transmissor, não existindo a possibilidade de receber dados e o LED é utilizado para indicar que realizou-se a transmissão dos dados.

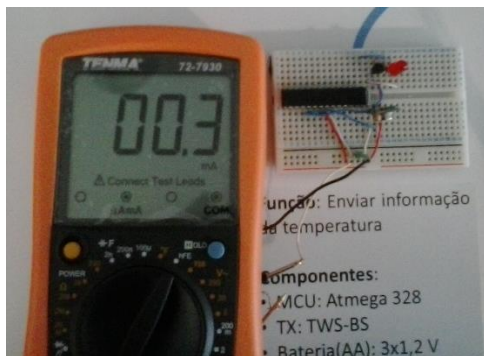

 Figura 5.22- Consumo energético mínimo “ASK 434 MHz” – *sleep*.


Figura 5.23- Consumo energético máximo “ASK 434 MHz”.

Na Figura 5.22 e Figura 5.23 denota-se o baixo consumo da placa elaborada, possuindo um corrente de alimentação de 0,3 e 6,6 mA para os estados de *sleep* e de consumo energético máximo, respectivamente.

A outra forma de monitoração consiste em recorrer ao *shield* elaborado, constituído pelo módulo de comunicação RN-XV, cuja frequência de comunicação é de 2,4 GHz e o padrão é o 802.11 b/g, realizando um servidor de uma página da Internet (*web page*), visível na Figura 5.24.

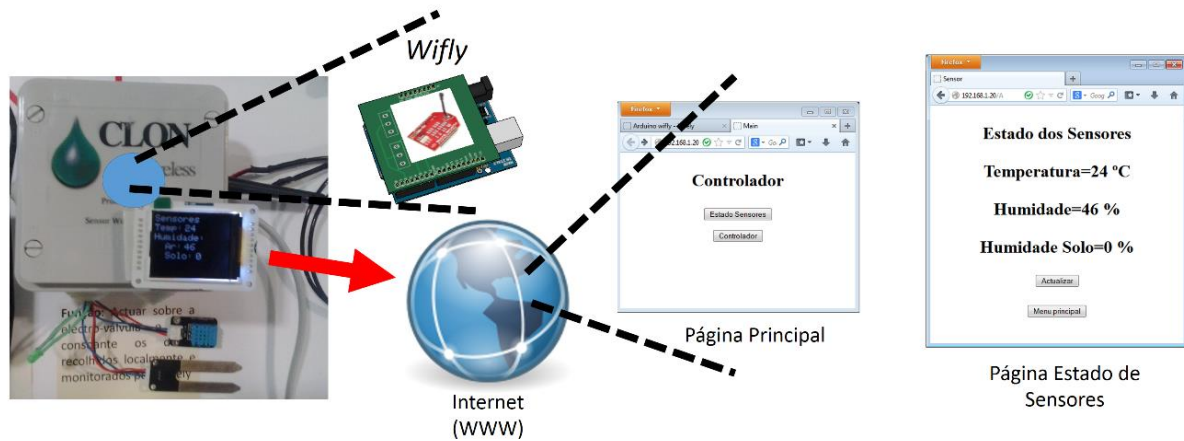


Figura 5.24- Diagrama página da Internet.

A abordagem elaborada (Arduino + *shield*), representada na figura anterior, possui diversos componentes nomeadamente um LED, dois sensores e um ecrã *Thin-Film Transistor* (TFT). Os sensores utilizados são o DTH11 e o SEN0114. No qual, o primeiro sensor fornece a indicação relativamente à temperatura e humidade do ar e utiliza uma interface digital para comunicar com o MCU. E o segundo sensor (SEN0114) monitoriza a humidade do solo e possui uma interface analógica. Relativamente aos restantes elementos (LED e ecrã TFT) serve para auxiliar tanto o programador como o consumidor na depuração (*debug*) do programa como na monitoração das operações realizadas, por exemplo mostra localmente (ecrã TFT) os dados dos sensores.

Na categoria actuação, o utilizador tem a capacidade de interagir com o meio através de uma electroválvula, auxiliado pelos dados recolhidos na categoria anterior (monitoração), demonstrado na Figura 5.25.

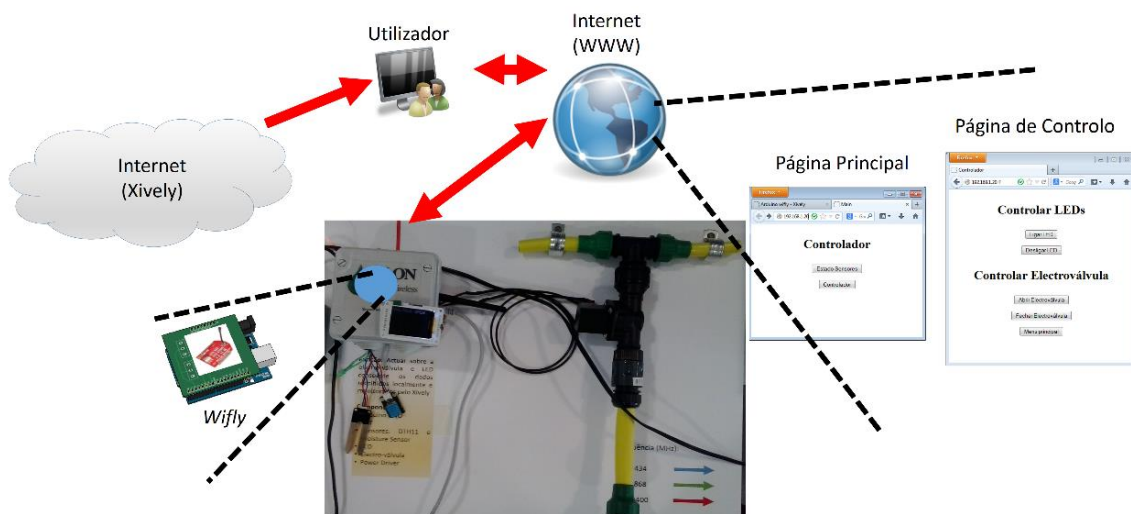


Figura 5.25- Diagrama da categoria actuação.

Portanto, o utilizador consegue remotamente adquirir conhecimento das grandezas recolhidas pelos diversos sensores (mostrados na Figura 5.15 e Figura 5.24) e com essa informação controlar,

também remotamente o LED e a electroválvula. De realçar que para accionar a electroválvula recorreu-se a um *power driver*.

5.6. Integração da WSAN num Contexto Agrícola

O exemplo que se segue remete para a inclusão da WSAN num contexto agrícola, conforme assinalado na secção 1.2.

Como já mencionado anteriormente a plantação em estufa proporciona melhores condições, isolando a sua plantação de condições climatéricas adversas, nomeadamente geada, granizo, frio extremo.

A estufa para além de fazer um “isolamento” das condições climatéricas indesejadas, tem como função aproveitar os recursos ambientais desejados. Devido a esta ser revestida por uma película, que deixa passar a radiação solar durante o dia e retém a energia térmica no interior da estufa durante a noite [51].

Portanto, com as vantagens descritas anteriormente, referentes à estufa agrícola e complementando esta com a WSAN, optimiza-se as condições para o óptimo desenvolvimento da plantação, promovendo a “maximização” do processo de fotossíntese.

A WSAN para além de otimizar o crescimento da plantação, contribui com uma maior durabilidade da estrutura da estufa, já que permite antecipar os efeitos de condições meteorológicas adversas.

Aspectos a ter em conta relativamente ao cultivo neste ambiente:

1. monitorização de fenómenos físicos para optimizarem o crescimento da verdura, essencialmente temperatura e humidade;
2. carácter preventivo da sanidade da plantação, estando relacionado com a alínea anterior, mas focada nos momentos exactos para promover o melhor tratamento à plantação, por exemplo tempo de rega, aplicação de químicas. Tendo, como objectivo não existir uma devastação da plantação, devido a procedimentos incorrectos (ex. aplicação de químicas em dias muito quentes);
3. carácter preventivo da estrutura da estufa, associado aos danos que podem ser causados pelas condições adversas exteriores (ventos fortes), caso exista uma inadequada utilização da mesma. Exemplo, esquecimento por parte do Agricultor no fecho das janelas da estufa, podendo este acto levar ao rebentamento da estrutura, em virtude dos ventos fortes.

Mecanismo e soluções que a WSAN deve estar munida para superar os factos assinalados anteriormente:

1. o Nó deve possuir sensores para monitorizar a temperatura, humidade do ar e do solo, barómetro, anemómetro (para medir a velocidade do vento) e cata-ventos (indicar a direcção do vento). Sendo que os primeiros três sensores são utilizados para promover uma óptima condição dentro da estufa e os restantes sobre a estrutura desta;
2. utilização de uma topologia híbrida, ilustrada na Figura 5.26, para que exista uma comunicação eficiente. É composta por dois tipos de Nós, o Nó central (circunferência preta) e o Nó secundário (circunferência branca). O Nó secundário só pode comunicar (seta) com o Nó principal e é munido com poucos recursos de hardware. Por outro lado, o Nó central possui mais recurso e pode comunicar com qualquer tipo de Nós;
3. uma das formas da interacção de comunicação entre os dispositivos da WSN, encontra-se ilustrado na Figura 5.26, procedendo-se da seguinte maneira. O Nó secundário recolhe dados proveniente do meio e envia-os para o Nó central. Este processa essa informação, podendo este interagir como o meio (através de actuadores) e/ou utilizar o meio da Internet para interagir com o Agricultor. Sendo que este, ao monitorizar as informações enviadas pela WSN, pode executar comandos sobre a rede.

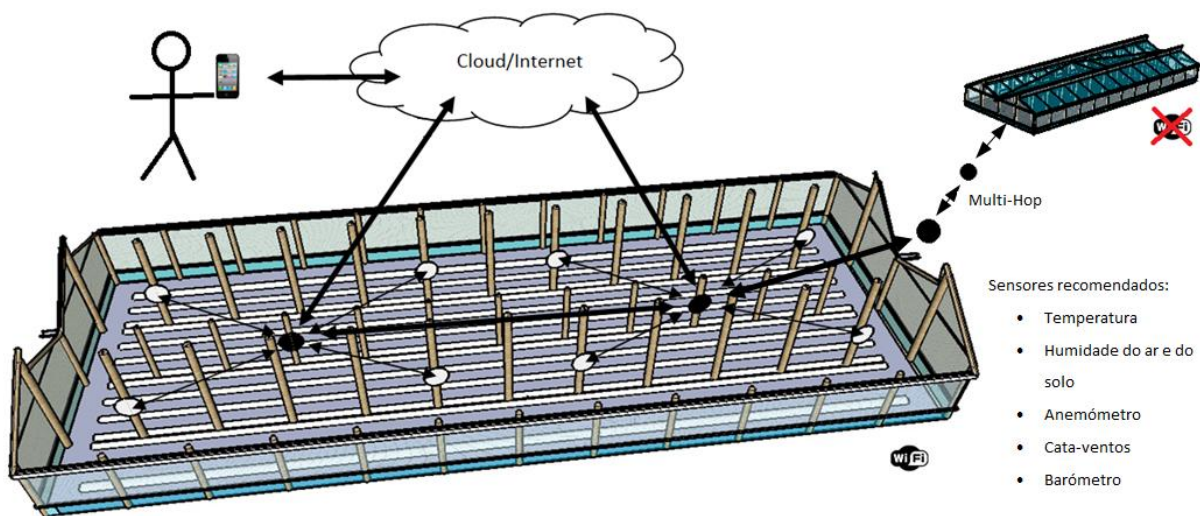


Figura 5.26- Topologia da aplicação 3.

Um aspecto que ainda não se mencionou é que estas estruturas (estufas) geralmente estão localizadas em zonas com pouco ou mesmo nenhuma cobertura de rede móvel, e que possuem longas distâncias entre elas. Portanto, caso seja impossível manipular as características inerentes à parte de comunicação, módulo de comunicação do transreceptor, nomeadamente aumentar o nível da potência de transmissão, aumentar a sensibilidade do receptor, entre outras. Tem-se que introduzir novos Nós, com a finalidade de retransmitir o sinal (*multi-hop*). Na Figura 5.26 possui esse caso implícito, como a estufa (distante) não possui cobertura WIFI recorre ao mecanismo *multi-hop* para comunicar não só com a estufa, mas recorrer a ela para reenviar os dados para a Internet.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

O foco deste trabalho consiste na WSN, sendo esta um conjunto de elementos dispersos numa área geográfica, denominados por Nó Sensor e Actuador (NSA).

Esta dissertação não se baseou apenas no carácter teórico do tema, existindo também uma forte componente de implementação e ensaio experimental. Com auxílio de aparelhos específicos (analisador espectral e osciloscópio) compreendeu-se por exemplo a interligação dos vários módulos inseridos no transreceptor (TH7122), nomeadamente no desencadeamento do sinal na parte de recepção, passando pelos diversos blocos (LNA, misturador, amplificador de frequência intermédia) até à fase de desmodulação do sinal, sendo esse sinal estudado no regime temporal e na frequência.

No decorrer deste projecto, mais precisamente na elaboração da placa de comunicação (primeira versão), não se incluiu a malha de adaptação entre a fase de entrada/saída do transreceptor e a antena (conector do tipo SMA de carácter resistivo 50 Ω), o que justifica um nível acrescido de atenuação do sinal.

A metodologia associada ao orçamento da ligação rádio (*link budget*) permite estimar o nível de potência necessário ao estabelecimento da comunicação entre o emissor e o receptor. Devido à complexidade do meio ambiente (para a propagação do sinal), é necessário ter em conta muitos factores referentes à área geográfica onde a rede vai ser inserida, nomeadamente efeitos causados pela vegetação, reflexão, refacção e difracção.

Relativamente ao método para a comunicação entre Nós, utilizou-se a priori a comunicação série. Em virtude da modulação escolhida ser ASK e a comunicação série ser *pull-up* (está a VCC quando não está a comunicar), inverteu-se o significado dos bits de comunicação (bit 1 da comunicação série passou para o sinal 0), permitindo assim diminuir o consumo energético do transreceptor.

Utilizando o método descrito anteriormente de comunicação com bits invertidos, verificou-se que este apresentava uma enorme taxa de erros. Portando, teve-se que encontrar uma solução mais fiável. Para tal, não basta apenas enviar os dados úteis, mas um pacote de dados. Composta principalmente por uma rajada de bits, sendo esta responsável pelo estabelecimento de uma tensão de referência essencial para a desmodulação da informação transmitida (*data slicer*), símbolo de início, para sincronizar o transmissor e o receptor. Codificação da mensagem para um bom balanceamento do sinal DC, tamanho da mensagem e enviar dados para auxiliar na verificar da integridade das mensagens. Ao enviar pacotes de dados, com a forma descrita, garante uma comunicação fidedigna. No qual, o receptor consegue saber se a mensagem enviada está correcta, devido a inclusão já mencionada, do tamanho e dos dados referentes à integridade da mensagem.

Devido à utilização de um vasto conjunto de componentes, realizando o manuseamento/controlo individualmente e em pequenos grupos (MCU e um módulo de

comunicação), obteve-se facilmente resultados pretendidos. Verificou-se/concluiu-se que com a integração, referente à programação de todos os componentes inseridos na placa, aumentou a complexidade do controlo desta, devida a ter que existir uma boa coordenação entre os vários módulos e estes possuírem escassos recursos de hardware. No qual, o pior problema que aconteceu foi a ocorrência do MCU paralisar devido à falta de memória RAM, demorando imenso tempo para descobrir, pois a placa foi projectada para operações remotas, sendo esta distribuída numa determinada área geográfica, não possui a facilidade de *debug*, como acontece no caso da placa Arduino.

Para solucionar o problema referente ao MCU, teve-se que utilizar os LEDs inseridos na placa para realizar o *debug* do programa, complementando esta abordagem com a utilização da comunicação série. No qual recorre-se à placa Arduino para realizar o *debug* do programa, comunicando com o computador (através do *Serial Monitor*). Conclui-se que deve-se utilizar especialmente numa primeira abordagem programas simples e aumentar gradualmente a sua complexidade e recorrer a métodos alternativos para contornar as principais carências. Ao realizar uma *Web page* teve-se que passar o código HTML da página da memória RAM para a memória *flash*.

Após a fase de projecto, desenvolvimento, fabricação da placa e solda dos componentes. Verificou-se que muitas placas não tinham o comportamento desejado. Realizando uma análise superficial sobre o assunto, avaliando as premissas, tais como, os componentes utilizados estarem localizados em locais seguros e em óptimas condições de armazenamento, quando existe o manuseamento do componente (na operação de solda) utiliza-se a pulseira (anti-estática) com ligação à terra. Concluiu-se que existiu uma incorrecta operação de solda. Este facto deve-se essencialmente aos componentes utilizados serem muito pequenos, como por exemplo o transreceptor TH7122, existindo um aquecimento excessivo do componente ao ser rigoroso na operação de solda, acabando por danificá-lo.

Relativamente a trabalhos futuros, pode haver um estudo mais detalhado do NSA realizado neste documento. Determinando por exemplo o alcance máximo das placas realizadas, realizar um estudo comparativo para diferentes frequências de comunicação (40 MHz versus 868 MHz), testar a performance do receptor (do transreceptor TH7122) calculando a sua sensibilidade, BER recorrendo por exemplo a um gerador de modulação e um gerador de sinal vectorial.

Outra área de interesse é a elaboração de uma versão melhorada da placa em estudo, utilizando essencialmente todos os componentes à excepção do MCU, devido a possuir poucos recursos de memória do tipo *flash* e SRAM, limitando a operação dos outros componentes.

Aproveitar o vasto potencial do transreceptor TH7122, de modo a abranger toda a gama de frequências de comunicação suportada por este, desde os 27 até aos 930 MHz, recorrendo, por exemplo, a interruptores programáveis.

Melhorar as características essencialmente de recepção do transreceptor, devido às características de transmissão em inúmeros casos já conseguem transgredir as regras estipuladas pela autoridade reguladora (ANACOM), como acontece para a banda ISM de 434MHz, cujo limite máximo é de 10 dBm, e o NSA em estudo consegue emitir uma potência de 12,35 dBm.

Para melhorar as condições de recepção, recorrer por exemplo a uma configuração que melhore a sensibilidade do receptor, nomeadamente na introdução de um filtro passa-banda de banda estreita antes do circuito já realizado.

Pode-se utilizar o trabalho já realizado e implementar uma rede de sensores e actuadores numa área específica.

A. ANEXO - Esquemático dos Circuitos

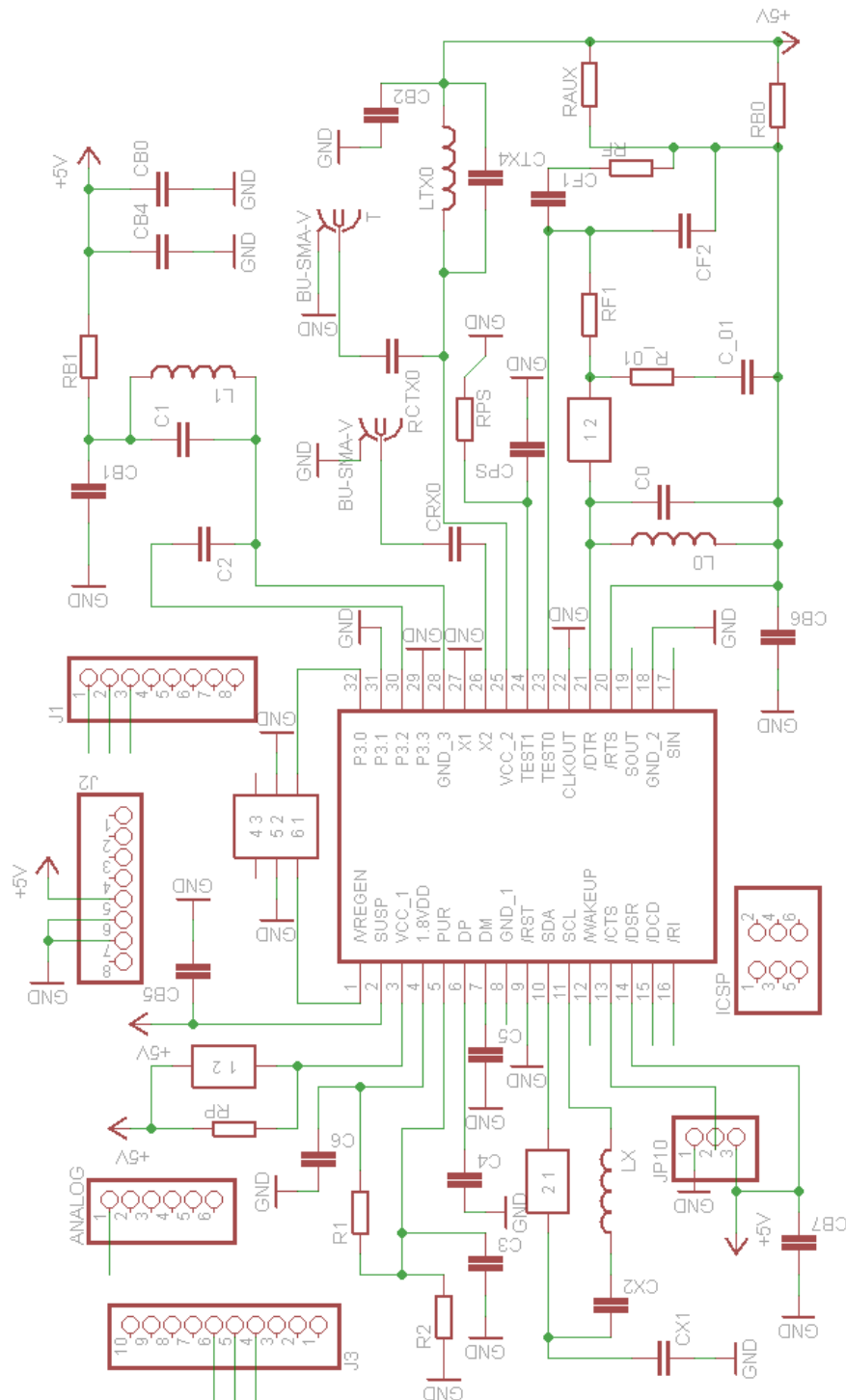


Figura A.1- Esquemático Amplo da Placa de Teste.

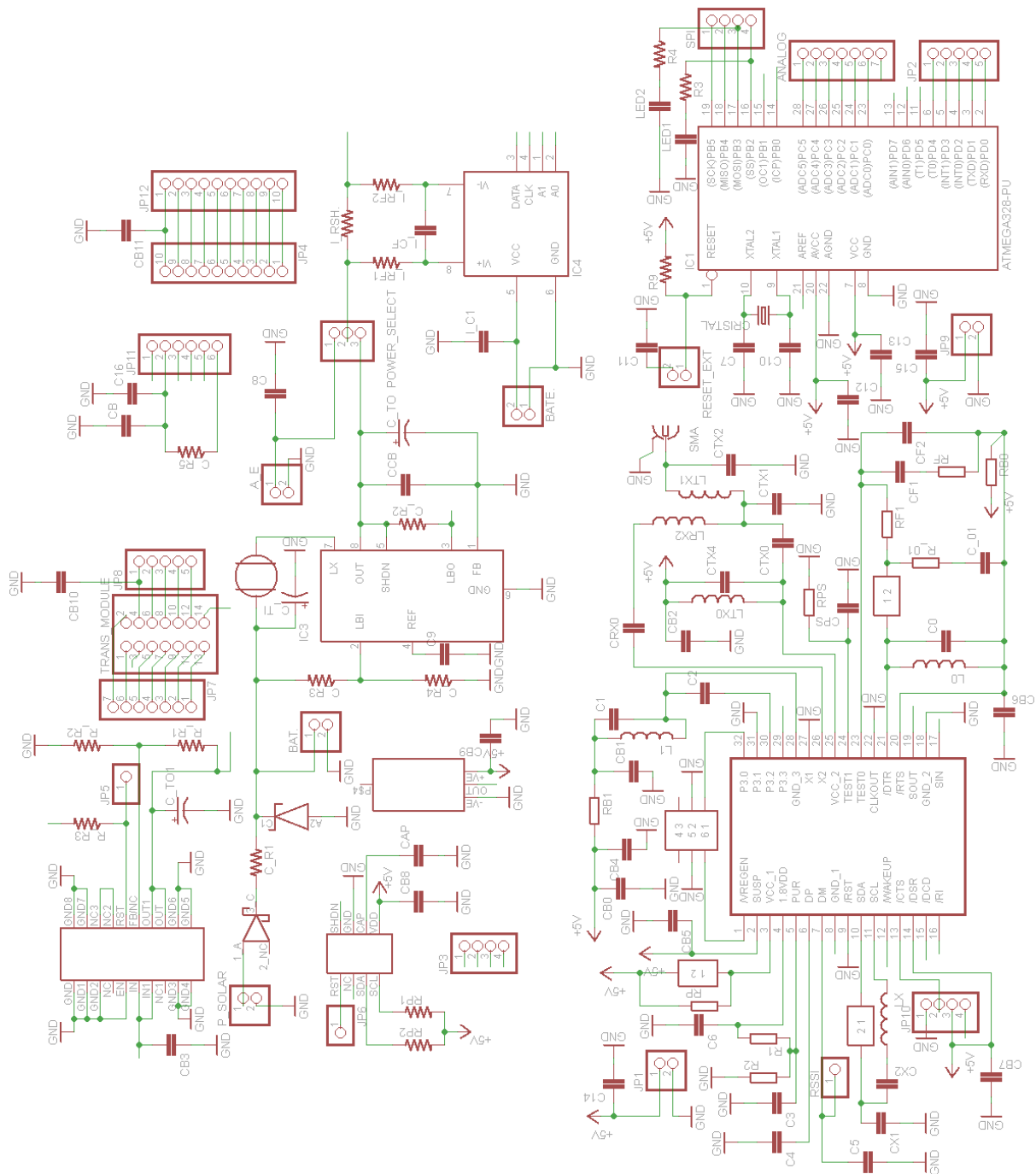


Figura A.2- Esquemático Amplo do Protótipo Final.

B. ANEXO - Software

B.1 para a Placa “Master”

```
//Arduino Board
//pino 10 SS
//pino 11 MOSI 16 SDTA
//pino 12 MISO 17 SDEN FSO
//pino 13 SCK 15 SCLK
//pino 2 19 FS1/LD
//pino 1 TX 12 ASK input mySerial_TX 5
//pino 0 RX 8 ASK output mySerial_RX 4
//#define P_SS 10
#define P_MOSI_SDТА 6//11 valores ant
#define P_MISO_SDEN 5//12
#define P_SCK 7//13

#include <avr/power.h>
#include <avr/sleep.h>
#include <avr/wdt.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <WiFiHq.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <VirtualWire.h>
WiFi wifly;

#define APIKEY
"wknnUFSvOb9aTuvglFbS7x6U9yrgbSKU
DuHZGGijonM1YRTu" // your cosm api
key

#define FEEDID 125401 // your feed ID
#define USERAGENT "Arduino wifly" // user agent
is the project name

const char mySSID[] = "3.5E";
const char myPassword[] = "Tele3.5E";
const char server[] = "api.xively.com";

unsigned long lastConnectionTime = 0; // last
time you connected to the server, in
milliseconds

boolean lastConnected = false; // state of
the connection last time through the main
loop

const unsigned long postingInterval = 5000; //delay
between updates to Cosm.com

int count=0;
const char string[8] PROGMEM = {'I','D','1','-','S','1','-','T'};

int modo_PUM=0; // variavel que define se o
transceiver esta no modo PUM se ==0 esta
no modo SUM ==1 modo PUM

int modo_oper=4; // se 4 sem estado se 0 standby
se 1 modo recepção se 2 transmissao se
3 inactivo

//Modo transmite
unsigned long endereco_A = 0b00;
unsigned long endereco_B = 0b01;
unsigned long endereco_C = 0b10;
unsigned long endereco_D = 0b11;
```

```
unsigned long registo_A =
0b0001001110100001010000;

unsigned long registo_B =
0b0111001110100000001000;

unsigned long registo_C =
0b0011000001000010001001;

unsigned long registo_D =
0b0010000000000110110010;

unsigned long registo_A_stand =
0b0000000010000001010000;

unsigned long registo_B_stand =
0b0111001110100000001000;

unsigned long registo_C_stand =
0b0000000001000010001001;

unsigned long registo_D_stand =
0b0010000000000110110010;

unsigned long registo_A_rec =
0b0000000010010001010000;

unsigned long registo_B_rec =
0b0110001110100000001000;

unsigned long registo_C_rec =
0b1000000001000010001001;

unsigned long registo_D_rec =
0b1010000000000110110010;

unsigned long registo_A_idle =
0b0000000010110001010000;

unsigned long registo_B_idle =
0b0111001110100000001000;

unsigned long registo_C_idle =
0b0000000001000010001001;

unsigned long registo_D_idle =
0b0010000000000110110010;

unsigned long tempo_ant;
//define o ritmo de transmissao da comunicação
serie
//valor por omissao (bps)
int bit_rate = 2400;
int ritmo_TX = 2400;
//colocar o terceiro parametro para inverter o sinal,
isto é geralmente o sinal 1 é 5 volt 0 é 0
volt
//e especialmente o tempo inactividade (idling) está
com amplitude 5 volt
// colocando o terceiro parametro inverte os sinais.
volatile int f_timer=0; //necessario para
go_sleep_timer1
//recepção virtual wire

char aux_nome[4];
char aux_temp[2];
char aux_nome8[4];
char aux_temp8[6];
char aux_nome1[3];
```

```
char msg[27];
char msg8[27];
char msg_S[9];

boolean estado_sleep = false; //qd se coloca no
modo sleep valor a true

//Para o rfm22
#include <SPI.h>
#include <RF22.h>

// Singleton instance of the radio
RF22 rf22;

int recebeu=0;
int recebeu8=0;
float temp=0;
//float temp8=12.12;
float temp8=0.00;
int dados1=0;
int dados8=0;
float tempo_i;
void setup ()
{
pinMode(A2, OUTPUT);
pinMode(P_MISO_SDEN, OUTPUT);
pinMode(P_MOSI_SDТА, OUTPUT);
pinMode(P_SCK, OUTPUT);
pinMode(3, OUTPUT); //pino do ganho do Ina
digitalWrite(P_SCK, LOW);
digitalWrite(P_MOSI_SDТА, LOW);
digitalWrite(P_MISO_SDEN, LOW);
digitalWrite(P_MISO_SDEN, LOW);
digitalWrite(3, LOW);
delay(500);
init_PUM(); // inicializar modo PUM
Serial.begin(9600);
vw_setup(2400); // Bits per sec
vw_set_rx_pin(8);
if (!wifly.begin(&Serial)) //está desactivado a parte
de debugger
{
delay(100);
}
delay(100);
/* Join wifi network if not already associated */
if (!wifly.isAssociated())
{
//Serial.println(F("Conectando..."));
wifly.setSSID(mySSID);
wifly.setPassphrase(myPassword);
wifly.enableDHCP();
wifly.save();
if (wifly.join())
{
delay(100);
}
else
{
delay(100);
```

| | | |
|--|--|---|
| <pre> } } else { delay(100); } wifly.setBroadcastInterval(0); // Desliga UPD broadcast if (!rf22.init()){ delay(100); } rf22.setModeRx(); delay(100); sendData(0); app_sleep_init(); enterSleep(); //sleep 4s sendData1(00.00); digitalWrite(A2,HIGH); delay(500); digitalWrite(A2,LOW); delay(500); } void loop () { app_sleep_init(); //configura o WDT e alimenta-o enterSleep(); //sleep 4s receber_msg(); if (recebeu==1) { switch (msg[8]) { case '1': //mySerial.println("Temperatura negativa"); dados1=1; break; case '2': //mySerial.println("Temperatura entre 0 e 30 graus"); dados1=2; break; case '3': //mySerial.println("Temperatura superior a 30 graus"); dados1=3; break; } } sendData(dados1); recebeu=0; </pre> | <pre> digitalWrite(A2,HIGH); delay(1000); digitalWrite(A2,LOW); delay(1000); app_sleep_init(); //configura o WDT e alimenta-o enterSleep(); //sleep 4s test_rx(); if ((recebeu8==1)) { temp8 = atof(aux_temp8); //converte para float sendData1(temp8); recebeu8=0; } digitalWrite(A2,HIGH); delay(500); digitalWrite(A2,LOW); delay(500); } // Saida do loop void receber_msg() { uint8_t buf[VW_MAX_MESSAGE_LEN]; uint8_t buflen = VW_MAX_MESSAGE_LEN; vw_rx_start(); write_reg(endereco_A,registro_A_rec); write_reg(endereco_B,registro_B_rec); write_reg(endereco_C,registro_C_rec); write_reg(endereco_D,registro_D_rec); //parte de recepção para o VW while (recebeu==0) { if (vw_get_message(buf, &buflen) // Non- blocking { app_sleep_init(); // Message with a good checksum received, dump it. //mySerial.print("Got: "); for (int i = 0; i < 9; i++) { //instruções necessárias na placa MASTER msg[i]=(char)buf[i]; } //recebeu mensagem processá-la e retansmitir e sleep } if (memcmp_P(msg,string,8)==0) { //aux_temp[0]=(char)buf[8]; </pre> | <pre> recebeu =1; } } vw_rx_stop(); } int test_rx() { uint8_t buf[RF22_MAX_MESSAGE_LEN]; uint8_t len = sizeof(buf); delay(100); while (recebeu8 == 0) { app_sleep_init(); //configura o WDT e alimenta-o if (rf22.recv(buf, &len)) // Should fail, no message available delay(100); rf22.waitAvailable(); if (rf22.recv(buf, &len)) { for (int i = 0; i < 5; i++) { app_sleep_init(); //configura o WDT e alimenta- o aux_temp8[i]=buf[i]; recebeu8=1; } } } } ISR(WDT_vect) { /* Check if we are in sleep mode or it is a genuine WDR. */ if(estado_sleep == false) //houve um break { /* The app has locked up, force a WDR. */ wdt_enable(WDTO_15MS); while(1); } else { wdt_reset(); /* Service the timer if necessary. */ estado_sleep = false; sleep_disable(); /* Inline function so OK to call from here. */ //configure_wdt(); não pode ser este procedimento, mas sim app_sleep_init(); app_sleep_init(); } } </pre> |
|--|--|---|

B.2 para a Placa “Multi-Hop”

| | | |
|--|---|---|
| <pre> #define P_MOSI_SDTA 11 #define P_MISO_SDEN 12 #define P_SCK 13 #define mySerial_RX 4 #define mySerial_TX 5 #include <avr/power.h> </pre> | <pre> #include <avr/sleep.h> #include <SoftwareSerial.h> #include <VirtualWire.h> int modo_PUM=0; // variavel que define se o transceiver esta no modo PUM se ==0 esta no modo SUM ==1 modo PUM </pre> | <pre> int modo_oper=4; // se 4 sem estado se 0 standby se 1 modo recepção se 2 transmissao se 3 inactivo //Modo transmite unsigned long endereco_A = 0b00; unsigned long endereco_B = 0b01; </pre> |
|--|---|---|

```

unsigned long endereco_C = 0b10;
unsigned long endereco_D = 0b11;

unsigned long registo_A =
    0b0001001110100001010000;
unsigned long registo_B =
    0b0111001110100000001000;
unsigned long registo_C =
    0b0011000001000010001001;
unsigned long registo_D =
    0b0010000000000110110010;

unsigned long registo_A_stand =
    0b0000000010000001010000;
unsigned long registo_B_stand =
    0b0111001110100000001000;
unsigned long registo_C_stand =
    0b0000000001000010001001;
unsigned long registo_D_stand =
    0b0010000000000110110010;

unsigned long registo_A_rec =
    0b0000000010010001010000;
unsigned long registo_B_rec =
    0b0110001110100000001000;
unsigned long registo_C_rec =
    0b1000000001000010000110;
unsigned long registo_D_rec =
    0b1010000000000110110010;

unsigned long registo_A_idle =
    0b0000000010110001010000; //modo
idle OPMODE==0b11
    0b000101111110001010000;
unsigned long registo_B_idle =
    0b0111001110100000001000;
unsigned long registo_C_idle =
    0b0000000001000010001001;
//0b0011000001000010001001;
unsigned long registo_D_idle =
    0b0010000000000110110010;

int bit_rate = 2400;
int ritmo_TX = 2400;
volatile int f_timer=0; //necessario para
go_sleep_timer1

char aux_nome[4];
char aux_temp[6];
char msg[27];
char msg_S[9];
void setup () {
    pinMode(P_MISO_SDEN, OUTPUT);
    pinMode(P_MOSI_SDTA, OUTPUT);
    pinMode(P_SCK, OUTPUT);
    digitalWrite(P_SCK, LOW);
    digitalWrite(P_MOSI_SDTA, LOW);
    digitalWrite(P_MISO_SDEN, LOW);
    digitalWrite(P_MISO_SDEN, LOW);
    delay(500);
    init_PUM(); // inicializar modo PUM
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("setup multi-hop");
    vw_setup(bit_rate); // Bits per sec

    vw_set_rx_pin(4);
    vw_set_tx_pin(5);
}

void loop ()
{
    float temp;
    int recebeu=0;
    recebeu = receber_msg();
    if (recebeu==1)
    {
        delay(100);
        //Serial.print("nome:");
        //Serial.print(aux_nome);

        delay(100);
        //Serial.print("temp:");
        temp = atof(aux_temp);
        Serial.print("Recebeu:");
        Serial.println(temp);
        //delay(1000);

        processar_msg(temp);
        Serial.print("Enviar:");
        Serial.println(msg_S);
        if (transmitir_msg())
        {
            Serial.println("TX");
            //go sleep
        }
        //else {}
    }
    else
    {
        Serial.println("Nao recebeu a mensagem");
    }
    delay(3000);
}

// Saida do loop
int receber_msg()
{
    uint8_t buf[VW_MAX_MESSAGE_LEN];
    uint8_t buflen = VW_MAX_MESSAGE_LEN;

    vw_rx_start();
    write_reg(endereco_A, registo_A_rec);
    write_reg(endereco_B, registo_B_rec);
    write_reg(endereco_C, registo_C_rec);
    write_reg(endereco_D, registo_D_rec);
    //parte de recepção para o VW
    if (vw_wait_rx_max(10000)) //espera 10s em
        modo recepção
    {
        if (vw_get_message(buf, &buflen)) // Non-
            blocking
        {
            int i;
            // Message with a good checksum received,
            dump it.
            //Serial.print("Got: ");
            for (int i = 0; i < buflen; i++)
            {
                //instruções necessárias na placa MASTER
                msg[i]=(char)buf[i];
                if ((i>=0)&&(i<3))
                {
                    aux_nome[i]=(char)buf[i];
                }
                else if ((i>=5)&&(i<10))
                {
                    aux_temp[i-5]=buf[i];
                }
            }

            //recebeu mensagem processá-la e retransmitir e
            sleep
        }
        vw_rx_stop();
        return 1;
        // processar_msg();
    }
    else
    {
        Serial.println("Espirou o tempo");
        return -1;
    }
}

void processar_msg(float temp)
{
    char aux='0';
    if (temp<0)
    {
        aux='1';
    }
    else if ((0<=temp) && (temp<30))
    {
        aux='2';
    }
    else
    {
        aux='3';
    }
    if (aux != '0')
    {
        sprintf(msg_S, "%s-S1-T%c", aux_nome, aux);
        //Serial.println("a enviar");
        //Serial.println(msg_S);
    }
}

int transmitir_msg()
{
    if (modo_PUM !=2)
    {
        write_reg(endereco_A, registo_A);
        write_reg(endereco_B, registo_B);
        write_reg(endereco_C, registo_C);
        write_reg(endereco_D, registo_D);
        modo_oper=2;
        vw_send((uint8_t *)msg_S, strlen(msg_S));
        vw_wait_tx(); // Wait until the whole message is
            gone
        return 1;
    }
    else
    {
        return 0;
    }
}

```

B.3 para a Placa “ASK 868 MHz”

```
#include <SPI.h>
#include <RF22.h>
#include <avr/power.h>
#include <avr/sleep.h>
#include <avr/wdt.h>
RF22 rf22;
float celsius;
#include <VirtualWire.h>
#include <OneWire.h>
OneWire ds(3); //define o pino associado ao sensor
           de temperatura DS18S20 (DQ)
char msg [27];
char char_T [6];
boolean estado_sleep= false; //qd se coloca no
           modo sleep valor a true
void setup()
{
  pinMode(7, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("TX 868 MHz");
  if (!rf22.init())
    Serial.println("RF22 init failed");
}
void loop()
{
  app_sleep_init(); //configura o WDT e alimenta-o
  enterSleep(); //dormir
  celsius = obter_Temp();
  if (celsius!=100.00)
  {
    dtostrf(celsius,1,2, char_T); //converte um float
                                   (celsius) para um char *, 2 campo é o
                                   comprimento minimo e o 3º é a precisao
    //demora cerca de 79.303 us arduino ShowInfo
    delay(200);
    Serial.print("Valor enviado: ");
    delay(50);
    Serial.println(char_T);
    delay(50);
    rf22.send((uint8_t*)char_T, sizeof(char_T));
```

```
rf22.waitPacketSent();
digitalWrite(7, HIGH); // turn the LED on (HIGH is
           the voltage level)
delay(1000); // wait for a second
digitalWrite(7, LOW); // turn the LED off by
           making the voltage LOW
delay(1000);
// Serial.println("-----test_tx-----");
}
}
float obter_Temp()
{
  byte present = 0;
  byte type_s=1;
  byte data[12];
  byte addr[8];
  float celsius1;
  //++SENSOR DE TEMPERATURA DS18S20++++
  if ( !ds.search(addr)) {
    ds.reset_search();
    delay(250);
    return 100.00;
  }
  ds.reset();
  ds.select(addr);
  ds.write(0x44, 1);
  delay(1000); // maybe 750ms is enough, maybe
           not
  present = ds.reset();
  ds.select(addr);
  ds.write(0xBE); // Read Scratchpad

  for (int i = 0; i < 9; i++) { // we need 9 bytes
    data[i] = ds.read();
  }

  // Convert the data to actual temperature
  // because the result is a 16 bit signed integer, it
  should
```

```
// be stored to an "int16_t" type, which is always 16
           bits
// even when compiled on a 32 bit processor.
int16_t raw = (data[1] << 8) | data[0];
if (type_s) {
  raw = raw << 3; // 9 bit resolution default
  if (data[7] == 0x10) {
    // "count remain" gives full 12 bit resolution
    raw = (raw & 0xFFF0) + 12 - data[6];
  }
}
celsius1 = (int)raw / 16.0;
return celsius1;
}
ISR(WDT_vect)
{
  /* Check if we are in sleep mode or it is a genuine
           WDR. */
  if(estado_sleep == false) //houve um break
  {
    /* The app has locked up, force a WDR. */
    wdt_enable(WDTO_15MS);
    while(1);
  }
  else
  {
    wdt_reset();
  }
  /* Service the timer if necessary. */
  estado_sleep = false;
  sleep_disable();

  /* Inline function so OK to call from here. */
  //configure_wdt(); não pode ser este
           procedimento, mas sim app_sleep_init();
  //app_sleep_init();
}
}
```

B.4 para a Placa “ASK 434 MHz”

```
#include <avr/power.h>
#include <avr/sleep.h>
#include <avr/wdt.h>
#include <VirtualWire.h>
#include <OneWire.h>
OneWire ds(2); //define o pino associado ao sensor
           de temperatura DS18S20 (DQ)
char msg [27];
void setup()
{
  pinMode(9,OUTPUT);
  vw_setup(2400); // Bits per sec
```

```
vw_set_tx_pin(3); //define o pino para transmitir os
           dados
}
void loop()
{
  char char_T [6];
  float celsius = obter_Temp();
  if (celsius!=100.00)
  {
    dtostrf(celsius,1,2, char_T); //converte um float
                                   (celsius) para um char *, 2 campo é o
                                   comprimento minimo e o 3º é a precisao
```

```
//demora cerca de 79.303 us arduino ShowInfo
delay(200);
sprintf(msg,sizeof(msg),"ID1-
           T%s\0",char_T); // coloca no
           array de char o "" para o caso do float não
           aparece correctamente (aparece ?)
delay(200);
vw_send((uint8_t *)msg, strlen(msg));
vw_wait_tx(); // Wait until the whole message is
           gone
digitalWrite(9, HIGH);
delay(1000);
digitalWrite(9, LOW);
```

| | | |
|--|---|---|
| <pre> delay(1000); enterSleep(); } } float obter_Temp() { byte present = 0; byte type_s=1; byte data[12]; byte addr[8]; float celsius; //+++++++SENSOR DE TEMPERATURA DS18S20+++++ if (!ds.search(addr)) { //Serial.println("No more addresses."); //Serial.println(); ds.reset_search(); delay(250); return -1000; } ds.reset(); </pre> | <pre> ds.select(addr); ds.write(0x44, 1); delay(1000); present = ds.reset(); ds.select(addr); ds.write(0xBE); for (int i = 0; i < 9; i++) { data[i] = ds.read(); } int16_t raw = (data[1] << 8) data[0]; if (type_s) { raw = raw << 3; if (data[7] == 0x10) { // raw = (raw & 0xFFF0) + 12 - data[6]; } } celsius = (float)raw / 16.0; return celsius; ISR(WDT_vect) { } </pre> | <pre> void enterSleep(void) { MCUSR &= ~(1<<WDRF); WDTCR = (1<<WDCE) (1<<WDE); WDTCR = 1<<WDP0 1<<WDP1 1<<WDP2; /* 2.0 seconds */ /* Enable the WD interrupt (note no reset). */ WDTCR = _BV(WDIE); /* EDIT: could also use SLEEP_MODE_PWR_DOWN for lowest power consumption. */ set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_DOWN); sleep_enable(); /* Now enter sleep mode. */ sleep_mode(); /* The program will continue from here after the WDT timeout*/ sleep_disable(); /* First thing to do is disable sleep. */ /* Re-enable the peripherals. */ power_all_enable(); } </pre> |
|--|---|---|

B.5 para a Placa “Wifly”

| | | |
|--|---|--|
| <pre> #include <avr/pgmspace.h> #undef PROGMEM #define PROGMEM __attribute__((section(".progmem.data"))) #undef PSTR #define PSTR(s) (__extension__({static prog_char __c[] PROGMEM = (s); &__c[0];})) #include <WiflyHQ.h> #include <SoftwareSerial.h> SoftwareSerial wifiSerial(7,5); Wifly wifly; void pag_principal(); void erro404(); char IP[15]; char buf[80]; char buf1[130]; const char mySSID[] = "3.5E"; const char myPassword[] = "Tele3.5E"; // Sensor de humidade e temp DHT11 /*includo Sensor de humidade do solo # the sensor value description # 0 ~300 dry soil # 300~700 humid soil # 700~950 in water */ #include <dht11.h> dht11 DHT; #define DHT11_PIN A4//11 #define SOLO_PIN AO int dht_temp,dht_humi; //electro-valvula // pino Arduino power driver pino #define ENABLE A3 //10 // pino 1 </pre> | <pre> #define ABRIR_VALVULA A1//8 // pino 2 #define FECHAR_VALVULA A2//9 // pino 7 #define TEMPO 100 //Screen #include <TFT.h> // Arduino LCD library #include <SPI.h> #define cs 10 #define dc 9 #define rst 8 TFT TFTscreen = TFT(cs, dc, rst); char opcao; void setup() { pinMode(2,OUTPUT); Serial.begin(9600); wifiSerial.begin(9600); if (!wifly.begin(&wifiSerial, &Serial)) { Serial.println(F("Falha ao inicializar o wifly")); wifly.close(); } //Se não estiver associado a uma rede configura a rede no módulo if (!wifly.isAssociated()) { Serial.println(F("Conectando...")); wifly.setSSID(mySSID); wifly.setPassphrase(myPassword); wifly.enableDHCP(); wifly.save(); if (wifly.join()) { Serial.println(F("Conectado a Rede")); } } </pre> | <pre> else { Serial.println(F("Falha ao conectar na rede")); wifly.close(); } } else { Serial.println(F("Pronto para entrar na rede")); } wifly.setBroadcastInterval(0); // Desliga UPD broadcast Serial.print(F("IP: ")); wifly.getIP(IP, sizeof(IP)); Serial.println(IP); wifly.setDeviceID("ShieldWiFi"); if (wifly.isConnected()) { Serial.println(F("Fechando outras conexões ativas")); wifly.close(); } wifly.setProtocol(WIFLY_PROTOCOL_TCP); if (wifly.getPort() != 80) { wifly.setPort(80); wifly.save(); wifly.reboot(); delay(3000); } pinMode (ABRIR_VALVULA, OUTPUT); pinMode (FECHAR_VALVULA, OUTPUT); pinMode (ENABLE, OUTPUT); </pre> |
|--|---|--|

```
// Put this line at the beginning of every sketch that
// uses the GLCD:
TFTScreen.begin();
escrever_TFT(IP,0);
}

void loop()
{
if (wifly.available() > 0)
{
if (wifly.gets(buf, sizeof(buf)))
{
if (strcmp_P(buf, PSTR("GET /"), 6) == 0)
{
while (wifly.gets(buf, sizeof(buf)) > 0)
{
// Ignora o restante da requisição
}

//pag_teste();
pag_main(); // Pula para a rotina que imprime a
página principal
}
else if (strcmp_P(buf, PSTR("GET /A"), 6) == 0)
//Verifica se é um GET na página de leituras
analógicas - 192.168.0.23/A
{
while (wifly.gets(buf, sizeof(buf)) > 0)
{
// Ignora o restante da requisição
}

pag_sensor(); //Vai para rotina que imprime a
página de leituras analógicas
}

else if (strcmp_P(buf, PSTR("GET /F"), 6) == 0)
//Verifica se é um GET na página de leituras
analógicas - 192.168.0.23/A
{
while (wifly.gets(buf, sizeof(buf)) > 0)
{
// Ignora o restante da requisição
}

pag_controlador(); //Vai para rotina que
imprime a página de leituras analógicas
}

else if (strcmp_P(buf, PSTR("GET /B"), 6) == 0)
//Verifica se é um GET na página de leituras
analógicas - 192.168.0.23/A
{
while (wifly.gets(buf, sizeof(buf)) > 0)
{
// Ignora o restante da requisição
}

ligar_LED(); //Vai para rotina que imprime a
página de leituras analógicas
}

else if (strcmp_P(buf, PSTR("GET /C"), 6) == 0)
//Verifica se é um GET na página de leituras
analógicas - 192.168.0.23/A
{
while (wifly.gets(buf, sizeof(buf)) > 0)
```

```
{
// Ignora o restante da requisição
}
}

else if (strcmp_P(buf, PSTR("GET /D"), 6) == 0)
//Verifica se é um GET na página de leituras
analógicas - 192.168.0.23/A
{
while (wifly.gets(buf, sizeof(buf)) > 0)
{
// Ignora o restante da requisição
}

valvula_ON(); //Vai para rotina que imprime a
página de leituras analógicas
}

else if (strcmp_P(buf, PSTR("GET /E"), 6) == 0)
//Verifica se é um GET na página de leituras
analógicas - 192.168.0.23/A
{
while (wifly.gets(buf, sizeof(buf)) > 0)
{
// Ignora o restante da requisição
}

valvula_OFF(); //Vai para rotina que imprime a
página de leituras analógicas
}

else
{
wifly.flushRx(); // Descarta o restante
da transmissão
erro404(); //Envia página de erro - link
não existe
}
}

void pag_main()
{
cabec_html();
/* Envia o corpo do email com protocolo
fragmentado
* Com isto o cliente sabe quando a mensagem
terminou
*/
wifly.sendChunkln(F("<html><title>Main</title>"));
wifly.sendChunk(F("<center><h1><p>Controlador
"));
wifly.sendChunkln(F("<p></h1></center>"));
opcao='A';
sprintf_P(buf1, sizeof(buf1),
PSTR("<p><center><button
onclick='\"window.location.href='http://%%
s/%c\">Estado
Sensores</button></center><p>\0"),IP,o
pcao);
wifly.sendChunkln(buf1);
opcao='F';
```

```
sprintf_P(buf1, sizeof(buf1),
PSTR("<p><center><button
onclick='\"window.location.href='http://%%
s/%c\">Controlador</button></center><
p>\0"),IP,opcao);
wifly.sendChunkln(buf1);
wifly.sendChunkln(F("</html>"));
wifly.sendChunkln();
}

void pag_sensor()
{
int humi_solo;
ler_dht();
humi_solo = analogRead(SOLO_PIN);
Serial.print("Humidade do solo");
Serial.println(humi_solo);
/* Envia Cabeçalho HTML*/
cabec_html();
/* Envia o corpo do email com protocolo
fragmentado
* Com isto o cliente sabe quando a mensagem
terminou
*/
wifly.sendChunkln(F("<html>"));
wifly.sendChunkln(F("<title>Sensor</title>"));

wifly.sendChunk(F("<center><h1><p>Estado dos
Sensores"));
TFTScreen.background(0,0,0);
TFTScreen.text("Sensores",0,0);

sprintf_P(buf1, sizeof(buf1),
PSTR("<p><center>Temperatura=%d
&ordm;C</center></p>\0"), dht_temp);
wifly.sendChunkln(buf1);

TFTScreen.text("Temp:",0,20);

sprintf_P(buf1,sizeof(buf1),
PSTR("%d\0"),dht_temp);
TFTScreen.text(buf1,65,20);

sprintf_P(buf1,
sizeof(buf1),PSTR("<p><center>Humidad
e=%d &#37;</center></p>\0"),
dht_humi);
wifly.sendChunkln(buf1);
TFTScreen.text("Humidade:",0,40);
TFTScreen.text(" Ar:",0,60);
TFTScreen.text(" Solo:",0,80);

sprintf_P(buf1,sizeof(buf1),
PSTR("%d\0"),dht_humi);
TFTScreen.text(buf1,65,60);

sprintf_P(buf1,sizeof(buf1),
PSTR("<p><center>Humidade Solo=%d
&#37;</center></p>\0"), humi_solo);
wifly.sendChunkln(buf1);
sprintf_P(buf1,sizeof(buf1),
PSTR("%d\0"),humi_solo);
TFTScreen.text(buf1,91,80);
```



```

opcao='A';
snprintf_P(buf1, sizeof(buf1),
    PSTR("<p><center><button
onclick=\"window.location.href='http://%
s/%c\">Atualizar</button></center><p
>0\"),IP,opcao);
wifly.sendChunkln(buf1);

opcao='';
snprintf_P(buf1, sizeof(buf1),
    PSTR("<p><center><button
onclick=\"window.location.href='http://%
s/%c\">Menu
principal</button></center><p></html>\\
0\"),IP,opcao);
wifly.sendChunk(buf1);
wifly.sendChunkln(F("</html>"));
wifly.sendChunkln();
}
// Envia a página principal
void pag_controlador()
{
/* Envia Cabeçalho HTML*/
cabec_html();
/* Envia o corpo do email com protocolo
fragmentado
* Com isto o cliente sabe quando a mensagem
terminou
*/
wifly.sendChunkln(F("<html>"));
wifly.sendChunkln(F("<title>Controlador</title>"));
wifly.sendChunk(F("<center><h1><p>Controlar
LEDs ");
wifly.sendChunkln(F("<p></h1></center>"));
opcao='B';
snprintf_P(buf1, sizeof(buf1),
    PSTR("<p><center><button
onclick=\"window.location.href='http://%
s/%c\">Ligar
LED</button></center><p>0\"),IP,opcao)
;
wifly.sendChunk(buf1);
opcao='C';
snprintf_P(buf1, sizeof(buf1),
    PSTR("<p><center><button
onclick=\"window.location.href='http://%
s/%c\">Desligar
LED</button></center><p>0\"),IP,opcao)
;
wifly.sendChunkln(buf1);
wifly.sendChunkln(F("<center><h1><p>Controlar
Electrov&aacute;lula</h1></center
>"));
opcao='D';
snprintf_P(buf1, sizeof(buf1),
    PSTR("<p><center><button
onclick=\"window.location.href='http://%
s/%c\">Abrir
Electrov&aacute;lula</button></center
><p>0\"),IP,opcao);
wifly.sendChunkln(buf1);
opcao='E';

```

```

snprintf_P(buf1, sizeof(buf1),
    PSTR("<p><center><button
onclick=\"window.location.href='http://%
s/%c\">Fechar
Electrov&aacute;lula</button></center
><p>0\"),IP,opcao);
wifly.sendChunkln(buf1);
opcao='';
snprintf_P(buf1, sizeof(buf1),
    PSTR("<p><center><button
onclick=\"window.location.href='http://%
s/%c\">Menu
principal</button></center><p>0\"),IP,o
pcao);
wifly.sendChunk(buf1);
wifly.sendChunkln(F("</html>"));
wifly.sendChunkln();
}
void ligar_LED()
{
digitalWrite(2,HIGH);
TFTscreen.background(0, 0, 0);
TFTscreen.text("LED ON",0,0);
cabec_html();
// Enviado página com codificada
wifly.sendChunkln(F("<html>"));
wifly.sendChunkln(F("<title>LED ON</title>"));
wifly.sendChunk(F("<center><h1><p>LED ligado
"));
wifly.sendChunkln(F("<p></h1></center>"));
opcao='F';
snprintf_P(buf1, sizeof(buf1),
    PSTR("<p><center><button
onclick=\"window.location.href='http://%
s/%c\">Menu
Anterior</button></center><p>0\"),IP,op
cao);
wifly.sendChunkln(buf1);
wifly.sendChunkln(F("</html>"));
wifly.sendChunkln();
}
void desligar_LED()
{
digitalWrite(2,LOW);
TFTscreen.background(0, 0, 0);
TFTscreen.text("LED OFF",0,0);
cabec_html();
wifly.sendChunkln(F("<html>"));
wifly.sendChunkln(F("<title>LED OFF</title>"));
wifly.sendChunk(F("<center><h1><p>LED
desligado ");
wifly.sendChunkln(F("<p></h1></center>"));
opcao='F';
snprintf_P(buf1, sizeof(buf1),
    PSTR("<p><center><button
onclick=\"window.location.href='http://%
s/%c\">Menu
Anterior</button></center><p>0\"),IP,op
cao);
wifly.sendChunkln(buf1);
wifly.sendChunkln(F("</html>"));
wifly.sendChunkln();
}

```

```

void valvula_ON()
{
digitalWrite(2,HIGH);

TFTscreen.background(0, 0, 0);
TFTscreen.text("VALVULA OPEN",0,0);
cabec_html();
wifly.sendChunkln(F("<html>"));
wifly.sendChunkln(F("<title>Valvula
OPEN</title>"));

wifly.sendChunk(F("<center><h1><p>Elec
trov&aacute;lula est&aacute; aberta"));
wifly.sendChunkln(F("<p></h1></center>"));
opcao='F';
snprintf_P(buf1, sizeof(buf1),
    PSTR("<p><center><button
onclick=\"window.location.href='http://%
s/%c\">Menu
Anterior</button></center><p>0\"),IP,op
cao);
wifly.sendChunkln(buf1);
wifly.sendChunkln(F("</html>"));
wifly.sendChunkln();
c_valvula_ON();
}
void valvula_OFF()
{
digitalWrite(2,LOW);
TFTscreen.background(0, 0, 0);
TFTscreen.text("VALVULA CLOSE",0,0);
cabec_html();
wifly.sendChunkln(F("<html>"));
wifly.sendChunkln(F("<title>Valvula
CLOSE</title>"));

wifly.sendChunk(F("<center><h1><p>Elec
trov&aacute;lula est&aacute; fechada"));
wifly.sendChunkln(F("<p></h1></center>"));
opcao='F';
snprintf_P(buf1, sizeof(buf1),
    PSTR("<p><center><button
onclick=\"window.location.href='http://%
s/%c\">Menu
Anterior</button></center><p>0\"),IP,op
cao);
wifly.sendChunkln(buf1);
wifly.sendChunkln(F("</html>"));
wifly.sendChunkln();
c_valvula_OFF();
}

int ler_dht()
{
int chk,estado;
Serial.print("DHT11, \\t");
chk = DHT.read(DHT11_PIN); // READ DATA
switch (chk){
case DHTLIB_OK:
Serial.print("OK,\\t");
dht_humi=DHT.humidity;
dht_temp=DHT.temperature;

```

| | | |
|---|--|---|
| <pre> estado= 1; break; case DHTLIB_ERROR_CHECKSUM: Serial.print("Checksum error,\t"); estado= 0; break; case DHTLIB_ERROR_TIMEOUT: Serial.print("Time out error,\t"); estado= 0; break; default: Serial.print("Unknown error,\t"); estado= 0; break; } return estado; } void c_valvula_ON() { </pre> | <pre> digitalWrite(ABRIR_VALVULA, HIGH); digitalWrite(FECHAR_VALVULA, LOW); delay(10); digitalWrite(ENABLE, HIGH); delay(TEMPO); digitalWrite(ENABLE, LOW); } void c_valvula_OFF() { digitalWrite(ABRIR_VALVULA, LOW); digitalWrite(FECHAR_VALVULA, HIGH); delay(10); digitalWrite(ENABLE, HIGH); delay(TEMPO); digitalWrite(ENABLE, LOW); } void escrever_TFT(char *texto,int pos_y) { // clear the screen with a black background </pre> | <pre> TFTscreen.background(0,0,0); // write the static text to the screen // set the font color to white TFTscreen.stroke(255,255,255); // set the font size TFTscreen.setTextSize(2); // write the text to the top left corner of the screen TFTscreen.text(texto,0,pos_y); // ste the font size very large for the loop TFTscreen.setTextSize(2); } void cabec_html() { /* Envia Cabeçalho HTML*/ wifly.println(F("HTTP/1.1 200 OK")); wifly.println(F("Content-Type: text/html")); wifly.println(F("Transfer-Encoding: chunked")); wifly.println(); } </pre> |
|---|--|---|

B.6 Funções/Procedimentos em Comum

Controlar o MCU

| | | |
|---|--|---|
| <pre> //envia o registo para o transceiver usando o metodo bit banging void write_reg(unsigned long endereco,unsigned long registo){ int aux=0; for (aux=0;aux<2;aux++) { int a= (endereco & 0x02); if (a == 0b10) { digitalWrite(P_MOSI_SDТА, HIGH); } else{ digitalWrite(P_MOSI_SDТА, LOW); } digitalWrite(P_SCK, LOW); digitalWrite(P_SCK, HIGH); digitalWrite(P_SCK, HIGH); digitalWrite(P_SCK, LOW); } } </pre> | <pre> endereco = (endereco << 1); } for (aux=0;aux<22;aux++) { if (registo & 0x200000) { digitalWrite(P_MOSI_SDТА, HIGH); } else{ digitalWrite(P_MOSI_SDТА, LOW); } digitalWrite(P_SCK, LOW); digitalWrite(P_SCK, HIGH); //pulso do clock digitalWrite(P_SCK, HIGH); digitalWrite(P_SCK, LOW); registo = registo << 1; } //finalização da mensagem de registo digitalWrite(P_MOSI_SDТА, LOW); </pre> | <pre> digitalWrite(P_MISO_SDТА, HIGH); digitalWrite(P_MISO_SDТА, LOW); delay(5); } //##### ##### # int init_PUM(){ // inicializar modo PUM digitalWrite(P_MISO_SDТА, HIGH); delay(5); digitalWrite(P_MISO_SDТА, HIGH); delay(5); digitalWrite(P_MISO_SDТА, LOW); delay(5); modo_PUM=1; } } </pre> |
|---|--|---|

Enviar dados para o Xively

| | | |
|--|--|--|
| <pre> void sendData(int thisData) { if (wifly.open(server, 80)) { //Serial.println("connecting..."); // send the HTTP PUT request: wifly.print(F("PUT /v2/feeds/")); wifly.print(FEEDID); wifly.println(F(".csv HTTP/1.1")); wifly.println(F("Host: api.xively.com")); wifly.print(F("X-APIKey: ")); wifly.println(APIKEY); wifly.print(F("User-Agent: ")); wifly.println(USERAGENT); wifly.print(F("Content-Length: ")); </pre> | <pre> // calculate the length of the sensor reading in bytes: // 8 bytes for "sensor1," + number of digits of the data: int thisLength = 9;//12 + getLength(thisData); wifly.println(thisLength); // last pieces of the HTTP PUT request: wifly.println(F("Content-Type: text/csv")); wifly.println(F("Connection: close")); wifly.println(); // here's the actual content of the PUT request: wifly.print(F("sensor1,")); wifly.println(thisData); //costuma não terminar a ligação TCP if (wifly.isConnected()) </pre> | <pre> { wifly.close(); } } else { wifly.close(); } } void sendData1(float thisData) { if (wifly.open(server, 80)) { //Serial.println("connecting..."); </pre> |
|--|--|--|

| | | |
|---|--|---|
| <pre>// send the HTTP PUT request: wifly.print(F("PUT /v2/feeds/")); wifly.print(FEEDID); wifly.println(F(".csv HTTP/1.1")); wifly.println(F("Host: api.xively.com")); wifly.print(F("X-APIKey: ")); wifly.println(APIKEY); wifly.print(F("User-Agent: ")); wifly.println(USERAGENT); wifly.print(F("Content-Length: ")); //Serial.println("Data posted.");</pre> | <pre>// calculate the length of the sensor reading in bytes: // 8 bytes for "sensor1," + number of digits of the data: int thisLength = 13;//12 + getLength(thisData); wifly.println(thisLength); // last pieces of the HTTP PUT request: wifly.println(F("Content-Type: text/csv")); wifly.println(F("Connection: close")); wifly.println(); // here's the actual content of the PUT request: wifly.print(F("sensor2,"));</pre> | <pre>wifly.println(thisData); if (wifly.isConnected()) { wifly.close(); } } else { wifly.close(); } }</pre> |
|---|--|---|

Modo Sleep com recurso ao watchdog timer

| | | |
|---|--|---|
| <pre>/****** * Name: enterSleep * Returns: Nothing. * Parameters: None. * Description: Enters the arduino into sleep mode. *****/ void enterSleep(void) { set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_DOWN); /* EDIT: could also use SLEEP_MODE_PWR_DOWN for lowest power consumption. */ estado_sleep = true; sleep_enable(); sei(); /* Now enter sleep mode. */ sleep_mode(); /* The program will continue from here after the WDT timeout*/</pre> | <pre>sleep_disable(); /* First thing to do is disable sleep. */ /* Re-enable the peripherals. */ power_all_enable(); } inline void configure_wdt(void) { /* A 'timed' sequence is required for configuring the WDT, so we need to * disable interrupts here. WDTCSR = 1<<WDP1 1<<WDP2; /* 1.0 seconds */ //WDTCSR = 1<<WDPO 1<<WDP1 1<<WDP2; /* 2.0 seconds */ //WDTCSR = 1<<WDPO 1<<WDP3; /* 8.0 seconds */ //WDTCSR = 1<<WDP3; /* 4.0 seconds */ /* Enable the WD interrupt (note no reset). */ cli();</pre> | <pre>wdt_reset(); MCUSR &= ~_BV(WDRF); /* Start the WDT Config change sequence. */ WDTCSR = _BV(WDCE) _BV(WDE); /* Configure the prescaler and the WDT for interrupt mode only*/ //WDTCSR = _BV(WDP0) _BV(WDP1) _BV(WDP2) _BV(WDIE); //2s WDTCSR = _BV(WDP0) _BV(WDP3) _BV(WDIE); //8s //WDTCSR = _BV(WDP3) _BV(WDIE); //4s sei(); } void app_sleep_init(void) { /* Setup the flag. */ estado_sleep = false; configure_wdt(); }</pre> |
|---|--|---|

Bibliografia

- [1] J. Coelho and J. Marques da Silva, "Agricultura de Precisão." [Online]. Available: http://agrinov.ajap.pt/agriprecisao_dia.asp. [Accessed: 20-Sep-2013].
- [2] J. Gillies, K. B. Stonehouse, L. C. Tollefson, and T. H. Hogg, "Application of LESA Technology in Saskatchewan Coefficient of Uniformity." [Online]. Available: http://www.agr.gc.ca/resources/prod/doc/pfra-arap/csdc-crdd/pdf/lesa_eng.pdf. [Accessed: 20-Sep-2013].
- [3] BPAE3T, "Low Energy Precision Application (LEPA) Irrigation." [Online]. Available: <http://e3tnw.org/ItemDetail.aspx?id=288>. [Accessed: 20-Sep-2013].
- [4] Stevens, "Stevens Agricultural Monitoring (SAM) System." [Online]. Available: http://www.stevenswater.com/soil_moisture_sensors/sam.aspx. [Accessed: 20-Sep-2013].
- [5] S. Labs, "The Evolution of Wireless Sensor Networks," 2013. [Online]. Available: <http://www.silabs.com/Support Documents/TechnicalDocs/evolution-of-wireless-sensor-networks.pdf>. [Accessed: 18-Aug-2013].
- [6] I. F. Akyildiz and M. C. Vuran, *Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons Ltd, 2010, p. 517.
- [7] "SMART DUST." [Online]. Available: <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/>. [Accessed: 19-Sep-2013].
- [8] W. Dargie and C. Poellabauer, *FUNDAMENTALS OF WIRELESS SENSOR NETWORKS THEORY AND PRACTICE*. A John Wiley and Sons, Ltd., 2010, p. 331.
- [9] M. Stojanovic, "Underwater Acoustic Communication," *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. John Wiley & Sons, pp. 688–698, 1999.
- [10] H. Karl and A. Willig, *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2005, p. 507.
- [11] "G013. What is meant by ISM applications and how are the related frequencies used?" [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-R/terrestrial/faq/index.html>. [Accessed: 19-Sep-2013].
- [12] K. Sohraby, D. Minoli, and T. Znati, *WIRELESS SENSOR NETWORKS Technology, Protocols, and Applications*. John Wiley & Sons, Inc, 2007, p. 326.
- [13] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey," *Comput. Networks*, vol. 50, no. 13, pp. 2127–2159, Sep. 2006.
- [14] A. C. Inc., "FCC Rules for Unlicensed Wireless Equipment operating in the ISM bands." [Online]. Available: <http://www.afar.net/tutorials/fcc-rules/>. [Accessed: 20-Sep-2013].
- [15] C. W. Sayre, *Complete Wireless Design*, Second Edi. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008, p. 719.

-
- [16] H. Lehpamer, *Microwave Transmission Networks: Planning, Design, and Deployment*, Second Edi. The McGraw-Hill Companies., 2010, p. 497.
- [17] Melexis, “TH7122 Transceiver - 27 to 930MHz, FSK/FM/ASK, Multi-Channel.” [Online]. Available: <http://www.melexis.com/General/General/TH7122-121.aspx>. [Accessed: 20-Sep-2013].
- [18] S. Haykin, *Communication-Systems*, Fourth edi. John Wiley & Sons, Inc., 2001, p. 838.
- [19] I. A. Nacional, “Quadro nacional de atribuição de frequências,” 2011. [Online]. Available: http://www.anacom.pt/streaming/qnaf2010_2011_20junho2012.pdf?contentId=1129525&field=ATTACHED_FILE. [Accessed: 04-Sep-2013].
- [20] S. Willis and C. J. Kikkert, “Design of a Long-Range Wireless Sensor Node,” vol. 00, pp. 151–154, 2006.
- [21] S. Willis and C. Jan Kikkert, “Radio propagation model for long-range wireless sensor networks,” *2007 6th Int. Conf. Information, Commun. Signal Process.*, pp. 1–5, 2007.
- [22] M. Integrated, “Data Slicing Techniques for UHF ASK Receivers.” [Online]. Available: <http://www.maximintegrated.com/app-notes/index.mvp/id/3671>. [Accessed: 20-Aug-2013].
- [23] “Automatic Frequency Control.” [Online]. Available: <http://www.radartutorial.eu/09.receivers/rx11.en.html>. [Accessed: 21-Aug-2013].
- [24] Melexis, “TH7122 High Speed Data Communication.” [Online]. Available: <http://www.melexis.com/Assets/TH7122-High-Speed-Data-Communication-3764.aspx>. [Accessed: 20-Sep-2013].
- [25] Melexis, “TH7122 Used In Narrow Band FSK Applications.” [Online]. Available: <http://www.melexis.com/Assets/TH7122-Used-In-Narrow-Band-FSK-Applications-3670.aspx>. [Accessed: 20-Sep-2013].
- [26] Melexis, “TH7122 and TH71221 Cookbook.” [Online]. Available: <http://www.melexis.com/Assets/TH7122-and-TH71221-Cookbook-3961.aspx>. [Accessed: 19-Aug-2013].
- [27] A. Corporation, “Guidelines for Designing High-Speed FPGA PCBs,” 2004. [Online]. Available: <http://www.altera.com/literature/an/an315.pdf>. [Accessed: 29-Aug-2013].
- [28] “Arduino.” [Online]. Available: <http://www.arduino.cc/>. [Accessed: 20-Sep-2013].
- [29] S. J. Orfanidis, “Scattering Parameters.” [Online]. Available: <http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/ch13.pdf>. [Accessed: 14-Aug-2013].
- [30] Battery University, “Primary Batteries.” [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/primary_batteries. [Accessed: 17-Sep-2013].
- [31] “Battery Knowledge.” [Online]. Available: <http://www.batteryspace.com/batteryknowledge.aspx>. [Accessed: 17-Sep-2013].
- [32] S.T.A., “Manual das Baterias Recarregáveis, Pilhas e Carregadores.” [Online]. Available: <http://www.sta-eletronica.com.br/manual.pdf>. [Accessed: 17-Sep-2013].

-
- [33] M. Thomaz, "Um pouco sobre Baterias." [Online]. Available: <http://www.hobbys.com.br/16umpoucobaterias.htm>. [Accessed: 17-Sep-2013].
- [34] Panasonic, "NICKEL METAL HYDRIDE BATTERIES: INDIVIDUAL DATA SHEET." [Online]. Available: http://www.mouser.com/ds/2/315/Panasonic_NiMH_HHR380A-179882.pdf. [Accessed: 12-Sep-2013].
- [35] Infopédia, "Efeito Seebeck." [Online]. Available: [http://www.infopedia.pt/\\$efeito-de-seebeck;jsessionid=6TpWRL8Mqs5zx8zUTpH1QQ__](http://www.infopedia.pt/$efeito-de-seebeck;jsessionid=6TpWRL8Mqs5zx8zUTpH1QQ__). [Accessed: 19-Aug-2013].
- [36] Solmetric, "Guide To Interpreting I-V Curve Measurements of PV Arrays," 2011.
- [37] "Curvas características das células fotovoltaicas." [Online]. Available: <http://alagador.tripod.com/4.htm>. [Accessed: 12-Sep-2013].
- [38] Adafruit, "Arduino UNO FAQ." [Online]. Available: <http://learn.adafruit.com/arduino-tips-tricks-and-techniques/arduino-uno-faq>. [Accessed: 05-Aug-2013].
- [39] A. Gilberti, "Arduino Uno and its USB." [Online]. Available: <http://www.gilberti-industries.com/2010/10/02/arduino-uno-and-its-usb/>. [Accessed: 15-Aug-2013].
- [40] Avrprogrammers, "ATmega8, ATmega48, ATmega88, ATmega168, ATmega328 Comparison." [Online]. Available: <http://avrprogrammers.com/doc-atmega8-atmega328.php>. [Accessed: 06-Sep-2013].
- [41] Hope Microelectronics Ltd, "Rfm22B/23B ISM TRANSCEIVER MODULE." [Online]. Available: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0f44/0900766b80f440d6.pdf>. [Accessed: 04-Sep-2013].
- [42] R. Networks, "RN-XV Data Sheet," 2011. [Online]. Available: <http://www.mouser.com/ds/2/349/WiFly-RN-XV-DS-219924.pdf>. [Accessed: 14-Sep-2013].
- [43] Sharp, "GP2W0004XP0F," 2007. [Online]. Available: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0d1f/0900766b80d1f962.pdf>. [Accessed: 05-Sep-2013].
- [44] Cooking-hacks, "Solar Module for Arduino Tutorial." [Online]. Available: <http://www.cooking-hacks.com/index.php/documentation/tutorials/arduino-solar>. [Accessed: 31-Aug-2013].
- [45] M. Integrated, "Compact , Step-Up DC-DC Converters MAX1674 / MAX1675 / MAX1676." [Online]. Available: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1674-MAX1676.pdf>. [Accessed: 31-Aug-2013].
- [46] Texas, "TPS775xx with RESET Output , TPS776xx with PG Output FAST-TRANSIENT-RESPONSE 500mA LOW-DROPOUT VOLTAGE REGULATORS UNIT," 2009. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps77533.pdf>. [Accessed: 20-Sep-2013].
- [47] J. Nickel, "Energia Solar, Simples de Usar," 252, Dec-2005.
- [48] M. Mccauley, "VirtualWire," 2013. [Online]. Available: <http://www.airspayce.com/mikem/arduino/VirtualWire.pdf>. [Accessed: 14-Sep-2013].

-
- [49] “RF22 library for Arduino.” [Online]. Available: <http://www.airspayce.com/mikem/arduino/RF22/index.html>. [Accessed: 15-Sep-2013].
- [50] T. Instruments, “CURRENT / POWER MONITOR with I 2 C TM Interface,” 2011. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf>. [Accessed: 15-Oct-2013].
- [51] Cidades sem Fome, “Estufas Agrícolas, construção e metodologia.” [Online]. Available: <http://cidadessemfome.org/pt/2012/01/estufas-agricolas-construcao-e-metodologia/>. [Accessed: 19-Oct-2013].